Nancy-Université
INPL

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.
Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur au même titre que sa version papier. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.
D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite entraîne une poursuite pénale.

Contact SCD INPL: mailto:scdinpl@inpl-nancy.fr

LIENS

Code de la propriété intellectuelle. Articles L 122.4
Code de la propriété intellectuelle. Articles L 335.2 – L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE EN GENIE DES SYSTEMES INDUSTRIELS

ECOLE DOCTORALE RP2E : SCIENCES ET INGENIERIE DES RESSOURCES, PROCEDES, PRODUITS, ENVIRONNEMENT

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPL
Discipline : Génie de Systèmes Industriels

présentée par

Liliana - Cristina CHITESCU

SIMULATION EN ERGONOMIE : FACTEUR D'INNOVATION DANS LA CONCEPTION DE PRODUITS

Application à la conception de systèmes de travail

Soutenue publiquement le 30 Novembre 2005 devant le Jury :

Directeurs de thèse :	Monsieur J-C. SAGOT, *Professeur, UTBM (Belfort)*
	Madame C. GUIDAT, *Professeur, ENSGSI (Nancy)*
Rapporteurs :	Monsieur A. AOUSSAT, *Professeur, ENSAM (Paris)*
	Monsieur S. RICHIR, *Professeur, ENSAM (Angers)*
Examinateurs	Monsieur M. CARRARD, *Professeur, Université Paris 11 (IUT Cachan)*
	Monsieur P. TRUCHOT, *Professeur, ENSGSI (Nancy)*

Citations

Vous savez ce que c'est que la recherche : on part sur une question et on trouve en cours de route des faits qui vous en posent une autre.

Philippe Meyer - Extrait de "Les Progrès du progrès"

La recherche, c'est repousser les limites de la connaissance.

Anonyme

A ma famille "à Moi",

A mes familles Roumaines et Françaises,

A mes amis

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit d'une recherche menée principalement au sein de l'équipe de recherche en ERgonomie et COnception de Systèmes du laboratoire de Systèmes et Transports (SeT-ERCOS) de l'Université de Technologie de Belfort - Montbéliard (UTBM). Cependant, ces travaux ont été co-encadrés par l'Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs (ERPI) de l'Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes Industriels (ENSGSI) de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL). C'est ainsi grâce à ces deux entités d'enseignement et de recherche que j'ai pu mener cette recherche et je leur dois mes remerciements.

Je remercie toutes les personnes qui ont réussi à me faire partager leur savoir et leur savoir-faire et qui m'ont permis de continuer ma formation et de "finaliser" ce travail de recherche.

Je remercie tout d'abord Monsieur Michel CARRARD de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse.

Je tiens remercier à Monsieur Améziane Aoussat de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'apporter son jugement sur mon travail de recherche en tant que rapporteur.

Je remercie également Monsieur Simon Richir d'avoir accepté d'évaluer ce travail de doctorat en tant que rapporteur.

J'adresse mes vifs remerciements à Madame Claudine GUIDAT, d'avoir autorisé mon inscription dans l'école qu'elle dirige et d'avoir accepté de co-encadrer ces travaux. Je la remercie d'avoir encouragé ces travaux et de m'avoir accordé une entière confiance et surtout beaucoup d'autonomie.

Je tiens à exprimer mon profond sentiment de reconnaissance à Monsieur Jean-Claude SAGOT, le responsable de l'équipe SeT-ERCOS, de m'avoir accueillie dans son laboratoire et surtout d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherche. Je le remercie d'avoir mis à ma disposition tous les moyens et les outils nécessaires pour l'aboutissement de ces études. Je le remercie également pour son soutien dans les moments difficiles, et ils ont été nombreux, pour ses observations et ses conseils qui m'ont permis d'évoluer.

Je présente mes grands remerciements à Monsieur Vincent Boly, le directeur du laboratoire ERPI, de m'avoir très bien accueillie dans son laboratoire, de m'avoir conseillée et encouragée durant la période finale de ces travaux. C'est grâce à vous, à votre manière d'aider, à votre façon d'expliquer et de vous faire comprendre par les autres, que j'ai réussi à reprendre confiance en moi-même et à faire au mieux pour atteindre mes objectifs de recherche. Le "contrat" est honoré et je vous en remercie infiniment. Je suis très contente pour ceux qui travaillent avec vous !

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur Patrick Truchot pour toute l'aide qu'il a pu m'apporter notamment durant cette dernière année de thèse. Son expérience, ses recommandations, ses qualités pédagogiques et humaines m'ont permis de persister et de mener à bien cette thèse.

Je remercie spécialement Madame Elise Marcandella pour la grande contribution tant scientifique qu'humaine qu'elle a réussi à m'apporter dans les moments peut-être les plus difficiles de la thèse. Tout mon respect et mon amitié pour une telle personne !

Je n'oublie pas Monsieur Benoît Roussel, toujours prêt à m'aider par ses conseils et encouragements très précieux. Merci beaucoup pour tout !

Je profite de l'occasion pour remercier également Madame Nadine Stoeltzlen pour toute son aide et toutes les conversations sympathiques que nous avons pu avoir. Toute mon amitié !

Je ne saurais oublier tous les membres du laboratoire ERPI de l'ENSGSI et du laboratoire SeT-ERCOS pour leur accueil chaleureux, pour les échanges et les discussions agréables que nous avons partagés. Merci à vous tous !

Je remercie également toutes les personnes qui ont participé à mes recherches expérimentales, parmi lesquelles je peux citer les responsables de l'entreprise LMS, les opérateurs, les autres partenaires, mais également les élèves ingénieurs de l'UTBM.

C'est l'occasion de remercier Monsieur Samuel Gomes pour toute l'aide qu'il a pu m'apporter pendant mon séjour à Belfort. Merci Sam pour tes conseils, pour tes encouragements et pour tout ce que tu m'as appris ! Tu m'as souvent aidé à retrouver le chemin de la recherche !

Toute ma reconnaissance à Monsieur Eric Gete, celui qui m'a aidé à découvrir encore plus "la CAO" C'est grâce à toi que j'ai pu avancer et me faire encore plus confiance dans ce domaine. Merci !

Merci à Sébastien Chevriau pour son grande "aide informatique" sans laquelle je n'aurais pas avancé dans mes recherches et surtout dans la matérialisation de mes hypothèses. Mes amitiés à toi, à Cécile et à Janelle !

Merci beaucoup à mon collègue et ami Guillaume Gronier, toujours à l'écoute et prêt à donner un coup de main. Merci pour toute ta gentillesse et bon courage pour la suite !

Je remercie également mes anciennes collègues Sylvie, Valérie, les deux Gérard, Patrick, etc., pour toute leur aide et leur soutien apporté pendant ces années de recherche.

Tout mon respect "à ceux "de l'UTBM, et il y a beaucoup (des professeurs, des collègues, des étudiants, des connaissances…que d'amis,…)…Merci à vous pour tout ce que vous m'avez apporté tout au long de mon séjour à Belfort ! Merci la COM ! Merci le DEP ! Merci à vous tous ! Soyez rassurés, personne n'est oublié !

Merci infiniment à tous mes ami(e)s, roumain(e)s et/ou français(e)s, qui ont réussi à me supporter et à me comprendre à tout moment ! Vous avez tous "votre place" dans un "endroit spécial"…Merci et bisous à vous tous !

Merci beaucoup, beaucoup à "ma petite sœur" Laura, celle qui a été toujours à mes côtés…qui a su m'écouter…qui a pu me supporter…qui m'a encouragée…qui… Laurici, ai avut dreptate cand spuneai "Sigur o sa termini !" Multumesc pentru tot ! Si eu voi fi intotdeauna langa tine !

Merci, merci, merci à mes familles, roumaines et/ou françaises…pour la patience que vous avez eue avec moi et pour votre soutien, vos encouragements…c'est peut-être grâce à vous que j'arrive "au bout du tunnel"…Merci la Normandie, la Franche-Comté, la Meurthe-et-Moselle, … !

Éloignée de vous, mais sans vous oublier…Tout mon respect et mes remerciements à mes anciennes professeurs et collègues de l'Université Polytechnique de Bucarest ! Merci de m'avoir aidé à "grandir" et de m'avoir encouragé à aller encore "plus haut", encore "plus loin" !

Un Merci Spécial j'adresse à quelqu'un de "Très Spécial"… Te recunosti, nu-i asa ? Contributia ta este nemasurabila ! Tu m-ai convins, mi-ai aratat "drumul meu"…Multumesc pentru tot si pentru totdeauna !

RESUME

Positionnée dans le domaine de Génie des Systèmes Industriels, notre recherche s'intéresse à ***l'intégration du facteur humain dans le processus de conception de produits et de systèmes de travail associés.*** *S'appuyant sur des connaissances, des méthodes et des outils spécifiques issues des disciplines Sciences pour l'Ingénieur et Sciences Humaines et Sociales, notre travail propose ainsi* ***une méthodologie de conception centrée sur l'Homme favorisant l'articulation "ergonomie – conception", dès le début et cela tout au long du processus.***

Portant sur la conception de systèmes de travail, la méthodologie proposée permet en particulier de dépister et d'évaluer certains facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS), dus notamment au travail, à la conception des outils, des postes de travail, etc., et de contribuer ainsi à la prévention de ces maladies professionnelles en constante augmentation depuis plusieurs années. Plus précisément, la démarche proposée est à même de ***définir, tester, évaluer et valider****, avec l'ensemble des acteurs métiers du processus de conception,* ***des maquettes numériques de futurs systèmes de travail*** *afin de pouvoir mieux les adapter aux futurs opérateurs, en termes de santé, sécurité, confort et efficacité au travail.*

Compte tenu de l'intérêt d'une intervention ergonomique considérée très tôt dans le processus de conception, nos recherches visent à montrer en particulier ***comment et à travers quels outils il est possible de définir et concevoir un futur système de travail à partir de l'observation et de l'analyse ergonomique d'une situation de travail existante.*** *Pour cela, nous nous appuyons sur les* ***outils de simulation que sont les mannequins numériques.*** *Véritables modèles 3D de l'Humain, ils semblent présenter des avantages significatifs par rapport aux méthodes et aux outils traditionnels de conception, permettant aux acteurs du projet de* ***mieux prendre en compte les caractéristiques des futurs utilisateurs (anthropométriques, biomécaniques,…).***

Notre intérêt porte en particulier sur le mannequin ***numérique MANERCOS - Module d'Analyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes****, outil qui a déjà fait l'objet d'un travail de thèse de doctorat au sein de l'équipe SeT-ERCOS. Dans la continuité de ces recherches, nous montrons comment la simulation numérique de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS) de l'opérateur, en termes biomécaniques (postures, efforts, répétitivité,…) et d'encombrement au travail, permet :*

- ***d'évaluer et de re-concevoir un système de travail existant*** *;*
- ***de concevoir un système de travail nouveau*** *intégrant le facteur humain.*

Les applications réalisées dans la conception de futurs systèmes de travail (outils et postes de travail) nous permettent à la fois ***de tester et de valider la méthodologie de conception ergonomique proposée****, mais également* ***d'évaluer et mettre en évidence les capacités et la richesse de l'outil MANERCOS.***

Nous insistons ensuite sur la manière dans laquelle notre méthodologie ainsi qu'un des outils associés, dont le mannequin numérique MANERCOS, peuvent ***évoluer pour mieux favoriser l'articulation "ergonomie – conception"*** *et donc* ***la coopération "ergonome – concepteur "****. En particulier, les nouvelles fonctionnalités de ce mannequin numérique, couplées à une centrale de mesure de mouvements et d'efforts (Centrale CAPTIV), peuvent permettre, par la prise en compte de l'Activité Gestuelle et Posturale,* ***une meilleure évaluation et prédiction des risques d'apparition de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS).***

En perspective*, nous nous proposons d'étudier* ***le couplage de l'outil MANERCOS à la plate-forme de réalité virtuelle*** *qui est en cours d'installation au sein de notre laboratoire de recherche. Il s'agit dans ce cas d'un premier objectif qui est d'évaluer à nouveau les pré-concepts proposés, dont les maquettes numériques retenues pour les futurs systèmes de travail. Cette évaluation devra se faire cette fois à l'aide* ***des futurs opérateurs immergés dans un environnement complètement virtuel.*** *Le couplage permettra la réalisation d'un deuxième objectif qui est* ***d'étalonner l'outil MANERCOS.***

En résumé, notre recherche met en évidence ***le caractère innovateur de la simulation de l'Activité Gestuelle et Posturale de l'Humain par le biais de l'outil MANERCOS****, et* ***son apport dans l'amélioration du processus de conception de futurs systèmes de travail, voire futurs produits adaptés à l'opérateur /utilisateur.***

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION……11

Lieu et objectifs de recherche……...12

Organisation du mémoire de thèse……...14

Ière Partie - PROBLEMATIQUE……...16

Introduction……18

I.1 Contexte industriel…….... 18

I.2 Nécessité des produits adaptés à l'Homme…… 20

I.2.1 Les problèmes d'usage des produits de grande diffusion…… 21

I.2.2 Les problèmes d'exploitation des produits industriels…… 22

I.3 Processus actuel de conception de produits…….. .28

I.3.1 Le mode d'organisation des activités de conception……29

I.3.2 Le mode d'organisation des acteurs participants à la conception……33

I.4 Vers une conception de produits de plus en plus anthropocentrée……37

I.4.1 L'ergonomie en tant que Science de l'Humain……39

I.4.2 L'intervention ergonomique lors de la conception de produits……40

I.4.3 Le modèle de conception anthropocentrée selon Sagot et al……47

I.4.4 Les limites de la conception anthropocentrée de produits……50

I.5 Besoin d'une meilleure articulation "analyse ergonomique – conception de produits"…….53

I.5.1 Positionnement de nos travaux de recherche……56

I.5.2 Hypothèses de recherche……58

IIème Partie - ASPECTS METHODOLOGIQUES - MEILLEURE ARTICULATION "ERGONOMIE - CONCEPTION" ……62

Introduction……64

II.1 Proposition d'une méthodologie de conception centrée sur l'Homme intégrant la simulation numérique de l'activité physique humaine……65

II.1.1 Les caractéristiques du modèle de conception anthropocentrée……65

II.1.2 Les phases du modèle proposé de conception anthropocentrée……68

II.2 Les mannequins numériques – outils d'aide à une conception centrée sur l'Homme……71

II.2.1 Historique et évolution des mannequins numériques……71

II.2.2 Critères de classification des mannequins numériques……73

II.2.3 Les applications des mannequins numériques. Intérêt pour la conception de produits.....74

II.2.4 MANERCOS - quel rapport avec les autres mannequins numériques?..... 76

II.2.4.1 Modélisation Anthropométrique.....78

II.2.4.2 Modélisation numérique du système Homme – Produit – Environnement.....80

II.2.4.3 Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain……81

II.2.4.4 Evaluation ergonomique du système Homme – Produit – Environnement à travers l'évaluation ergonomique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain.....83

II.3 L'intégration de la méthode de simulation numérique des activités physiques humaines à l'aide du mannequin numérique MANERCOS dans la méthodologie de conception centrée sur l'Homme……..87

IIIème Partie – EXPERIMENTATIONS - D'une "Ergonomie de correction" vers une "Ergonomie de conception". Application à la conception d'un nouveau système de travail. ……95

Introduction……..95

III.1 Contexte de l'expérimentation……..96

III.1.1 La demande de l'entreprise LMS……..96

III.1.2 Le groupe de travail "GT – LMS"……..97

III.1.3 Description de l'activité de filetage et du système de travail associé……98

III.2 Organisation des essais……..100

III.2.1 Organisation de l'intervention de l'équipe SeT-ERCOS…… 101

III.2.2 Objectifs et déroulement des expérimentations……..106

III.2.2.1 Objectiver les risques de TMS pendant la Phase 1(Etudes de faisabilité)…….. 106

III.2.2.1.1 Observer et analyser ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR) de filetage…...106

III.2.2.1.2 Simuler numériquement et évaluer ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale réelle (AGPR) de filetage……124

III.2.2.1.3 Définir certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail à l'aide d'un mannequin numérique……139

III.2.2.2 Rechercher des solutions pendant la Phase 2 (Etudes préliminaires)…….143

III.2.2.2.1 Définir des pré-concepts à travers la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail……...143

III.2.2.2.2 Evaluer ergonomiquement les pré-concepts proposés. Choix du meilleur pré-concept……..146

III.3 Conclusions de l'étude……158

IVème partie-DISCUSSIONS GENERALES. APPORTS ET LIMITES DE NOTRE TRAVAIL…….....161

Introduction……..161

IV.I Contributions……..161

IV.I.1 Contribution de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée……..161

IV.I.2 Contribution de la "nouvelle" méthode de simulation de l'Activité GP de l'Humain…….....166

IV.I.3 Contribution de l'outil - mannequin numérique – MANERCOS……...166

IV.2 Limites de notre travail de recherche……168

IV.2.1 Limites de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée…… .168

IV.2.2 Limites de la "nouvelle" méthode de simulation numérique de l'Activité GP de l'Humain ……168

IV.2.3 Limites de l'outil MANERCOS……169

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES……...171

CONCLUSIONS……..172

PERSPECTIVES DE RECHERCHE……172

BIBLIOGRAPHIE……174

ABREVIATIONS……...194

LISTE DE FIGURES……....196

ANNEXES……199

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Lieu et objectifs de recherche

Notre projet de thèse intitulé "*Simulation en ergonomie : facteur d'innovation dans la conception de produits"* s'inscrit dans la série de collaborations réalisées entre deux entités de recherche : le laboratoire ERPI (Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs) de l'ENSGSI (Ecole Nationale Supérieure de Génie de Systèmes Industriels) et le laboratoire SeT (Systèmes et Transport) de l'UTBM (Université de Technologie de Belfort - Montbéliard). Nos travaux de recherche ont été réalisés au sein de l'équipe ERCOS (ERgonomie et COnception de Systèmes), une des composantes de notre laboratoire d'accueil SeT.

L'objectif général de cette recherche est *d'apporter une contribution à l'amélioration de la méthodologie de conception centrée sur l'Homme proposée par l'équipe SeT-ERCOS*, à travers une meilleure utilisation des connaissances, des méthodes et par le développement d'outils spécifiques relevant **des Sciences pour l'Ingénieur et des Sciences Humaines et Sociales.** En effet, cette méthodologie envisage d'aider les entreprises à développer des systèmes, des produits, des outils, des dispositifs,… mieux adaptés aux besoins et aux attentes des utilisateurs/opérateurs, en termes de ***Qualité – Coût - Délais***, mais surtout de ***Confort, Santé et Sécurité d'usage/d'exploitation***.

Ainsi, notre recherche se positionne dans **le domaine du Génie des Systèmes Industriels (GSI)**, qui étudie **la confrontation de plusieurs sciences** : *techniques, économiques, sociales, humaines, etc*. En effet, ce domaine s'intéresse au Système Industriel, donc à ses différents composants (entreprises, outils et moyens de production, ressources humaines, etc.), mais surtout aux interactions qui apparaissent entre ces derniers.

Nous proposons ainsi une *"nouvelle" méthodologie de conception centrée sur l'Homme*, applicable notamment aux **produits industriels (ex : postes de travail, moyens et outils de travail, etc.)** et implicite aux **systèmes de travail associés**, qu'il convient de définir. Ainsi, selon la Norme Européenne EN 614-1, intitulée *"Sécurité des machines – Principes ergonomiques de conception – Partie 1: Terminologie et principes généraux"* [AFNOR,1995], **un système de travail** *"comprend **une ou plusieurs personnes** et **les moyens de travail**, **agissant ensemble** pour effectuer **une tâche**, à*

l'intérieur de l'espace de travail dans ***l'environnement de travail****, selon les conditions d'exécution de la tâche à effectuer."*

Concevoir un poste de travail, un moyen ou un outil de travail impose, d'après cette définition, de prendre en compte les autres composants du système de travail, dont *l'Opérateur et l'Environnement de travail*, mais de considérer également leurs interactions. De ce fait, nous proposons d'adopter **une approche systémique** dans notre méthodologie, qui permet de concevoir, par exemple, des postes de travail à travers l'étude du **système "Opérateur - Poste de travail - Environnement de travail".**

Cette méthodologie se propose, à l'appui de *l'évaluation des facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS), maladies périarticulaires dues notamment au travail*, de contribuer à **une meilleure prise en compte des capacités et caractéristiques humaines des opérateurs**, dès les premières phases du processus de conception de ces postes de travail, encore **au stade "prématuré"** de **maquettes numériques.** Pour cela, nous retenons **les mannequins numériques,** outils de simulation capables de reproduire *les caractéristiques anthropométriques et les Comportements Gestuels et Posturaux (CGP) des opérateurs,* lors de l'utilisation/exploitation de leurs postes de travail. Notamment, **le mannequin numérique MANERCOS (Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes),** développé au sein de l'équipe SeT-ERCOS [Gomes,1999]**,** s'associe à cette méthodologie permettant, à travers **la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Réelles (AGPR)** des opérateurs, **d'identifier et d'évaluer certains facteurs biomécaniques** *(postures pénibles, gestes répétitives, cadences élevées, efforts importants)* de risques d'apparition de TMS sur les postes de travail analysés. Le même outil est capable par la suite de **définir et simuler des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS)** pour les futurs opérateurs, ***en terme de santé, confort et sécurité au travail.*** L'outil MANERCOS se présente ainsi comme un ***vrai support pour la conception et collaboration***, car les activités définies précédemment *guident les concepteurs dans leurs propositions de futurs postes de travail*. MANERCOS est aussi ***un outil facilitant la prise de décision*** car, grâce à son module d'évaluation ergonomique, ***il aide les concepteurs à faire leurs choix parmi les préconcepts proposés*** pour les postes de travail en cours de conception et ***de mieux comprendre les conséquences en terme de santé, sécurité,…, de leurs choix de conception.***

L'utilisation de l'outil MANERCOS à travers l'application de la méthodologie de conception proposée demeure **un réel outil d'aide à une conception centrée sur l'Homme.**

Les études conduites mettent en évidence également *les limites de cet outil de simulation*, nous permettant de définir par la suite *la manière dont celui-ci doit évoluer* en vue de favoriser, très tôt dans le processus de conception, une intégration encore meilleure de l'ergonomie.

Organisation du mémoire de thèse

Le rapport qui synthétise nos travaux de doctorat est ainsi structuré *en quatre parties :*

- ***Première partie* - PROBLEMATIQUE :** elle a pour objectif de présenter ***le contexte industriel actuel*** et de mettre en évidence ***les problèmes d'usage/exploitation*** posés par les produits actuels, de grande diffusion et/ou industriels (postes de travail), *en terme de santé, confort et sécurité* des utilisateurs et/ou opérateurs et de souligner leurs conséquences. Nous présentons dans un premier temps ***l'état actuel des connaissances sur le processus de conception de produits*** qui intègre, il convient de le préciser, assez peu **la fonction d'usage**. Nous analysons ensuite ***la manière dont l'ergonomie, discipline tout particulièrement concernée par la fonction d'usage, peut intervenir, selon les auteurs, dans ce processus***. Nous insisterons plus particulièrement sur *la méthodologie de conception centrée sur l'Homme proposée par Sagot et collaborateurs* [Sagot et al, 2003] du laboratoire SeT- ERCOS, car elle formalise bien l'intervention ergonomique. Nous évoquerons ses avantages, mais également ses limites. A partir de ces dernières, nous traduisons *nos objectifs et nos hypothèses de recherche qui visent* ***une conception encore plus anthropocentrée***.

- ***Deuxième partie* – ASPECTS METHODOLOGIQUES :** cette partie présente ***la méthodologie de conception centrée sur l'Homme***, destinée aux produits industriels (ex : postes de travail), méthodologie que nous proposons à l'appui du modèle initial développé par Sagot et al. Ainsi, nous expliquons *les étapes de ce processus de conception, en même temps que les outils qui y sont associés*. Nous insistons en particulier sur ***les deux premières phases de conception*** en abordant *le rôle que peuvent avoir les mannequins numériques, dont MANERCOS, à travers leurs* ***capacités de reproduire*** *les dimensions de l'humain, futur opérateur du "poste de travail" à concevoir,* ***leurs possibilités de simuler*** *les Activités Gestuelles et Posturales (AGP) du futur opérateur à l'exploitation du "futur poste de travail" et* ***leurs facilités d'évaluer*** *ces activités en terme de confort, santé et sécurité d'usage.*

- ***Troisième partie* - EXPERIMENTATIONS** : Dans cette partie, nous nous intéressons à ***l'application et la validation de la méthodologie proposée à la conception de futurs outils et postes de travail, dont de futurs systèmes de travail.*** Ainsi, nous montrons comment *la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de vrais opérateurs exploitant un outil sur un poste de travail existant* nous conduit vers deux voies de conception : **la re-**

conception de l'outil et du poste de travail existant (nouvel outil et nouveau poste de travail) ou **la conception d'un poste nouveau de travail.**

- ***Quatrième partie*** **- *DISCUSSIONS GÉNÉRALES. APPORTS ET LIMITES DE NOTRE TRAVAIL*** : elle présente l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux qui ***permettent d'évaluer à la fois la méthodologie proposée et la méthode de simulation numérique à l'aide de l'outil MANERCOS*** et de mettre en évidence *leurs avantages,* ainsi que *leurs limites.*

  Nous soulignons ainsi ***notre contribution à une meilleure intégration de l'ergonomie dans la conception de postes/systèmes de travail*** *à travers la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de futurs opérateurs.* Nous montrons également **notre apport à l'amélioration de la conception de produits industriels** à travers l'outil MANERCOS, qui favorise la collaboration "ergonome - concepteur" dans le processus.

Les CONCLUSIONS *de notre recherche* soulignent ***le caractère innovateur de la prise en compte de l'ergonomie*** *et* ***la contribution qu'elle peut apporter au processus de conception de postes/systèmes de travail*** et cela à travers ***la méthode de simulation numérique de l'activité physique humaine*****.** Nous mettons en évidence que **les mannequins numériques**, en particulier MANERCOS, sont des ***moyens puissants et indispensables pour le processus de conception centrée sur l'Homme.***

Les PERSPECTIVES présentent des *voies d'amélioration des couplages existant entre l'outil MANERCOS et les autres outils associés à la méthodologie proposée*, afin de réaliser une *meilleure articulation "ergonomie – conception".* Nous expliquons notamment comment la consolidation des liens vers ***la troisième phase de la méthodologie de conception proposée*** pourra résoudre encore mieux les problèmes soulevés par notre recherche de doctorat.

Les derniers paragraphes présentent la bibliographie, la liste des figures et les abréviations des divers concepts que nous allons évoquer au fur et à mesure dans ce document de thèse.

Première Partie

PROBLEMATIQUE

TABLE DE MATIERES

Iere Partie PROBLEMATIQUE 18
Introduction 18
I.1 Contexte industriel 18
I.2 Nécessité des produits adaptés à l'Homme 20
I.2.1 Les problèmes d'usage des produits de grande diffusion 21
I.2.2 Les problèmes d'exploitation des produits industriels 22
I.3 Processus actuel de conception de produits 28
I.3.1 Le mode d'organisation des activités de conception 29
I.3.2 Le mode d'organisation des acteurs participants à la conception 33
I.4 Vers une conception de produits de plus en plus anthropocentrée 37
I.4.1 L'ergonomie en tant que Science de l'Humain 39
I.4.2 L'intervention ergonomique lors de la conception de produits 40
I.4.3 Le modèle de conception anthropocentrée selon Sagot et al. 47
I.4.4 Les limites de la conception anthropocentrée de produits 50
I.5 Besoin d'une meilleure articulation "analyse ergonomique – conception de produits" 53
I.5.1 Positionnement de nos travaux de recherche 56
I.5.2 Hypothèses de recherche 58

Iere Partie PROBLEMATIQUE

Besoin d'une meilleure intégration des caractéristiques humaines, à travers l'ergonomie, dans la conception des systèmes de travail

"Il y a bien moins de difficultés à résoudre un problème qu'à le poser."

Joseph de Maistre

Introduction

Dans cette partie, nous montrons que les entreprises sont soumises à un environnement qui les amène de plus en plus à concevoir *"plus vite, moins cher, des systèmes de qualité"* et cela dans un contexte de développement durable. De plus, le besoin d'une parfaite adaptation entre les spécifications de produits et les contraintes ergonomiques et d'usage s'impose. De ce fait nous analysons l'une des conséquences pour l'entreprise : une formalisation et une recherche constante d'amélioration du processus de conception. Par voie de conséquence, le processus de conception devient un thème de recherche important pour le Génie des Systèmes Industriels.

Dans ce travail nous décrirons notre centrage sur une partie de la problématique scientifique : *l'intégration des capacités et caractéristiques humaines dans la conception dans l'objectif de la rendre centrée sur l'Homme*. Plus précisément, nous avons été conduit à approfondir deux aspects : ***la formalisation du processus amont de la conception*** (phases *Etudes de faisabilité* et *Etudes préliminaires*), ainsi que ***les outils numériques qui peuvent y être associés***.

I.1 Contexte industriel

Le monde évolue… Saturation et mondialisation des marchés, compétition, changements organisationnels, progrès technique et technologique, amélioration de la qualité, maîtrise des coûts et des délais de production, etc… sont des expressions qu'on entend régulièrement dans le monde du travail …

Jusqu'au milieu des années 1970, l'environnement industriel était stable et prévisible, l'offre était la dominante des marchés [Romon,1998]. Depuis, la compétition industrielle a changé et cela en raison de la saturation des marchés traditionnels et de l'ouverture des frontières [Perrin,2001]. Aujourd'hui, l'entreprise industrielle travaille sur des marchés dominés par la demande [Romon,1998]. **La compétitivité est devenue de plus en plus mondiale** et **le climat social de plus en plus confus,** avec une grande influence sur l'environnement économique. L'entreprise d'aujourd'hui est ainsi obligée de résister et de s'adapter en permanence. "Rester compétitive" devient une obligation [Truchot,1997; Duchamp,1999]. La compétitivité représente en effet "le moteur de l'entreprise" car "générateur" de profit [Dalpont,1999]. Pour ce faire, **l'entreprise se doit d'innover constamment** afin de répondre au plus vite aux besoins et aux attentes des clients devenus de plus en plus exigeants [Boly,2004].

Dans ce contexte industriel mouvementé s'ajoute également **l'évolution rapide des sciences et de la technologie industrielle** [Kolski,1997]. Notamment le progrès dans les domaines des Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication, qui amène l'entreprise industrielle **à repenser ses stratégies, à revoir sa façon de s'organiser, mais aussi sa manière de concevoir des produits.** La capacité de développer rapidement et efficacement de nouveaux produits et de gérer des quantités de plus en plus importantes d'informations, tout en intégrant de nouvelles techniques, devient un avantage concurrentiel décisif. **Le temps** est aujourd'hui une **variable stratégique** dans la gestion de l'entreprise [Perrin,2001]. Ainsi, de nouveaux termes, comme **"réactivité"**, **"design"**, **"ergonomie"**, **"innovation"**, sont de plus en plus présents au sein des entreprises.

A cela s'ajoutent de nouvelles contraintes qui s'imposent à l'entreprise. Il s'agit notamment des **réglementations de plus en plus sécuritaires** et **des restrictions environnementales et sociales de divers ordres** qui doivent s'intégrer de plus en plus dans sa sphère de préoccupations [Tiger et Millet,1998].

C'est dans ce contexte industriel que **la compétitivité** devient une des préoccupations majeures pour l'entreprise. Elle doit s'appuyer aujourd'hui sur **la réduction des coûts et la rationalisation de la production, la qualité bien sûr,** voire de plus en plus sur **la valeur d'usage de ses produits** [Marty,1999; Roussel,1997; Sagot,1999]. L'enjeu majeur de l'entreprise industrielle est de s'adapter en permanence aux attentes des clients et à leurs évolutions, par une offre de produits qui respecte toujours la triade **"Qualité - Coût - Délais"** [Bourgeois,1995; Sagot,1996; Romon,1998; Grosjean,2000; Perrin,2001]. La devise actuelle de l'entreprise est alors : ***"Faire moins cher, plus vite, des systèmes de bonne qualité, sans polluer "*** [Tichkiewitch,1998]. Le client doit se situer alors au cœur de ses préoccupations.

Ce sont des exigences pour l'entreprise actuelle qui doit mettre en cause ou étudier encore plus son processus de développement et de conception de produits.

En effet, **l'intensification de la concurrence** entre entreprises **-** conséquence de la saturation et la mondialisation des marchés, ainsi que les **changements organisationnels des entreprises,** résultat du **progrès technologique mondial** [Tollenaere,1998], permettent l'amplification et la diversification de l'offre de produits/services et simultanément l'augmentation de l'exigence des clients. Ils s'agit en effet de ce qu'on appelle **"la personnalisation des produits"** [Guidat,1997]. Et face à une demande en constante évolution et à une offre très variée, **le marché de produits devient de plus en plus complexe.** Nous pouvons évoquer l'apparition des nombreux produits pour lesquels l'utilisation demeure parfois très complexe [Sagot,1996; Brime,1997; Brangier,2003]. Cela a des effets négatifs, à la fois pour les utilisateurs en terme de confort, santé, sécurité, mais aussi pour l'entreprise, en terme de coûts et de rendement de la production. En effet, ces produits **ne sont pas toujours adaptés aux caractéristiques humaines,** la responsabilité de cela incombant à leur processus de conception : *problèmes de temps, de compétences, de coopération, démarche technocentrée, etc.* Malgré son caractère de plus en plus pluridisciplinaire, la conception privilégie toujours **"les caractéristiques techniques"** des futurs produits, au détriment **"des caractéristiques humaines et sociales".** Parmi ces dernières, **la fonction d'usage** est souvent un des aspects mal intégrés à la conception, fait d'ailleurs bien perceptible au niveau de certains des produits du marché actuel.

I.2 Nécessité des produits adaptés à l'Homme

Le contexte industriel actuel favorise, sur la base de ce qui vient d'être dit, l'apparition sur le marché de nombreux produits de plus en plus innovants. Mais certains de ces produits demeurent complexes pour l'utilisateur. Il est d'ailleurs facile de constater les nombreuses difficultés que rencontrent les utilisateurs avec certains produits. A travers cela, nous allons mettre en évidence la nécessité "accrue" de concevoir des produits encore mieux adaptés à l'Homme. Les processus de conception de ces produits doivent alors évoluer vers une autre conception mieux centrée sur l'Homme.

Ainsi, la société d'aujourd'hui, en perpétuelle évolution, est confrontée à une offre de produits, dotés de **fonctionnalités de plus en plus nombreuses, riches et souvent compliquées** [Brime,1997]. Quel que soit leur type, **matériel donc tangible** (*imprimante, téléphone, télécommande, etc.*) ou **immatériel** (*logiciel, réseau de transport, services, organisations….*) [AFAV,1997], **les nouveaux produits deviennent de plus en plus complexes et sophistiqués pour les utilisateurs.** Parmi ceux-ci, certains **ont même perdu le souci primordial d'être une réponse aux besoins d'usage ou**

d'exploitation, **en termes de dialogue, sécurité, confort, santé et efficacité** [Sagot et al.,2002]. Malgré leurs fonctionnalités, leur qualité et leur fiabilité au sens technique, ces produits posent souvent des **difficultés d'utilisation ou d'exploitation** [Brocas,1997; Thomas, 2002; Brangier,2003] . Ce sont des **produits compliqués, "mal fichus", peu commodes ou inconfortables à utiliser / exploiter** [Brangier, 2003]. Ils sont souvent mal acceptés ou parfois même rejetés par les utilisateurs [Nicolet,1990 ; Schwach,1995].

Notre travail de recherche porte essentiellement sur ***les produits matériels***. Selon nous, en accord avec les travaux de Sagot, ceux-ci peuvent être classés en deux catégories [Sagot,1999] :

- les **produits de grande diffusion** (ex. ordinateurs, téléviseurs, voitures, …),
- les **produits industriels** (ex. outils, machines, postes de travail,…).

Les produits matériels de grande diffusion s'adressent à tout **utilisateur**, individu anonyme appartenant au grand public (ex. consommateur), voire dans certains cas à des professionnels [Sagot,1999].

Les produits industriels sont destinés à **l'opérateur** qui travaille dans des situations bien précises de l'industrie, de l'administration, de divers services,…

L'opérateur, en tant que professionnel, est caractérisé en fonction des tâches, des activités de travail qu'il doit réaliser en employant des produits industriels, tandis que l'utilisateur est caractérisé en fonction des usages des produits.

Ces produits montrent très souvent une inadéquation aux différentes caractéristiques et capacités des utilisateurs : *capacité physique, force musculaire, dimensions corporelles, possibilités de saisie des informations, capacité de traitement (perception et raisonnement) des informations* [Sagot,1996a]. La conception de ces produits n'intègre pas toujours l'homme, donc l'ergonomie, discipline "carrefour" [Aoussat,1990] qui a pour mission de prendre en compte tous ces aspects. Pour ce faire, l'ergonomie, dispose d'un ensemble de savoir-faire, d'un corps de connaissances, lui permettant d'analyser divers facteurs: *physiques, cognitifs, sociaux, organisationnels, environnementaux, etc.* Nous développerons cet aspect au niveau du paragraphe 1.4.1.

I.2.1 Les problèmes d'usage des produits de grande diffusion

Concernant les **produits matériels catalogués "de grande diffusion"**, de nombreuses enquêtes montrent, par exemple, que presque la moitié des utilisateurs des magnétoscopes ne savent pas enregistrer et que **la notice d'utilisation est trop compliquée** pour faciliter cette tâche. Les modes

d'emploi du lecteur CD-DVD ou du caméscope numérique ne sont pas meilleurs, car c'est seulement après plusieurs mois d'utilisation que les utilisateurs arrivent à bien connaître les fonctions de ces appareils [Ruef,1995]. Un autre exemple concerne les possesseurs de thermostats d'ambiance programmables, car un grand nombre d'entre eux considère ces appareils comme étant **très sophistiqués** et les utilise comme de simples interrupteurs. Encore, seulement deux ou trois des fonctions du téléphone sont couramment utilisées parmi plus d'une trentaine. La même remarque est valable pour la télécommande qui s'associe depuis déjà longtemps à des nombreux appareils "domestiques" (TV, magnétoscope, lecteur CD-DVD, etc). Avec 7 possibilités de réglage, positions mémorisables, dispositif de chauffage, etc, **le réglage des sièges automobiles devient si complexe** qu'il peut décourager l'utilisateur [Daniellou,1995; Ruef,1995; Brime,1997; Sagot,1996; Brocas,1997; Thomas,2002]. Des "produits maison" (four micro-ondes, machine à laver, sèche-linge, etc) ou des produits destinés aux lieux publics (distributeur de boissons, distributeur automatique de billets à la gare ou d'argent à la banque, de cabines de photos instantanées, etc), montrent la multiplication des interfaçages de la vie quotidienne, existants entre l'Homme et l'objet qu'il utilise [Brangier,2003].

Gage de modernité et performance, l'électronique, l'automatique, l'informatique, à travers "l'ordinateur", sont aujourd'hui présentes partout : à la maison, dans la voiture, dans la ville, au travail,… Face à de "telles invasions" de ces produits, la plupart des utilisateurs se trouvent dans une impasse, car leurs connaissances les amènent souvent à *une sous-utilisation* ou *une mauvaise utilisation du produit concerné*. L'affluence des nouvelles technologies fait ainsi que certains de ces produits deviennent *"de plus en plus obscurs"* pour l'utilisateur. Les problèmes montrés relèvent surtout du champ des Sciences Cognitives, sur lequel nous reviendrons plus loin.

I.2.2 Les problèmes d'exploitation des produits industriels

En ce qui concerne la deuxième catégorie de produits matériels, ceux qui **appartiennent au milieu industriel**, la situation n'est pas meilleure. Nous évoquons notamment **le cas d'outils, de postes de travail et des systèmes de travail qui deviennent de plus en plus automatisés et sophistiqués, posant de nombreux problèmes d'usage/d'exploitation aux opérateurs** [Maline,1997]. L'évolution de la technique a certainement sa part de responsabilité dans la "complexification" progressive de ces systèmes, mais ce n'est pas le seul facteur en cause [Amalberti,1996; Amalberti,1998]. Par rapport au passé, les opérateurs sont obligés d'assurer aujourd'hui une charge de travail de plus en plus forte, dans un environnement où le contenu du travail devient de plus en plus complexe. A titre d'exemple, l'affichage des informations fournies par une machine peut être une source de stress et de danger pour l'opérateur, car *sa complexité peut solliciter au maximum ses capacités de perception et de*

raisonnement [Sagot,1996a]. Cela signifie, comme dans l'exemple des produits de grande diffusion, que les **processus cognitifs** de l'humain ne sont pas souvent pris en compte lors de la conception de ces produits.

Mais, en plus de ces problèmes cognitifs, il en existe d'autres qui touchent notamment à **l'activité physique (gestes, postures, efforts,…)** de l'humain. Ainsi, les dimensions (hauteurs, surfaces,…) de certains plans de travail obligent souvent les opérateurs à effectuer des **gestes et postures contraignants** *(travail en position agenouillée, penché en avant, debout avec travail à bout de bras, couché, etc.)*, qui se situent en dehors du confort postural admis par les normes [Bellemare,2001; Monod,2003]. C'est par exemple le cas des postes de maintenance sur machines ou véhicules ou celui des installations de plomberies. Il s'agit en effet d'un **mauvais dimensionnement** de ceux-ci par rapport à la taille de l'opérateur.

La **pénibilité posturale** peut apparaître également pendant la manipulation des commandes sur certaines machines ou postes de travail. La raison est souvent dans ce cas un **mauvais emplacement des commandes** ou même **leurs forme et leurs dimensions** qui **ne respectent pas les caractéristiques physiques humaines**.

Il existe également un grand nombre de machines ou de dispositifs comportant des éléments de fonctionnement (levier à actionner, volant à tourner, chargement d'un malaxeur, etc.) qui imposent aux opérateurs d'exécuter des **efforts physiques excessifs en intensité** ou **en durée** ou des **gestes répétitifs**, mettant en danger leur santé et leur sécurité [Bellemare,2002; Monod,2003]. La forme, les dimensions, le poids de ceux-ci sont souvent **inadaptés à l'opérateur**.

Les exemples peuvent ainsi continuer : des postes de travail qui exposent les opérateurs à *des températures élevées ou basses*, à *des vibrations et bruits importants* qui dépassent de loin les niveaux recommandés par les normes, etc…

Les problèmes relevés s'expliquent souvent par une combinaison de facteurs. Le plus important semble être **un déséquilibre** entre **les sollicitations physiques et mentales de l'opérateur** qui travaille sur ces systèmes et **ses capacités fonctionnelles** en termes **biomécaniques, de possibilités de perception et traitement d'information,…** Les systèmes de travail sont ainsi mal adaptés à l'opérateur. Cela traduit **une mauvaise conception de ces moyens de travail**, qui ignore bien souvent la place de l'homme et son rôle en tant qu'**agent de fiabilité et de sécurité** [Danielou,1993; Sagot et al.,2002]. Une meilleure intégration du facteur humain est ainsi nécessaire lors de la conception de ces systèmes de travail et cela est possible à travers l'ergonomie, même si ce n'est pas la seule discipline concernée.

Aujourd'hui, l'utilisation ou l'exploitation de ces systèmes de travail par les opérateurs est une tâche de plus en plus difficile, autant **d'un point de vue physique** que **mental**. C'est devenu un vrai problème pour le milieu industriel. En effet, depuis plusieurs années, les entreprises sont confrontées à des **plaintes des opérateurs** réclamant **l'amélioration des conditions de travail, de la santé, de la sécurité et de la performance des systèmes de travail** [Sagot et al.,2003]. **L'inadéquation entre les systèmes de travail et les caractéristiques humaines des opérateurs associés est ainsi un facteur d'échec** autant **pour les entreprises** que **pour les opérateurs.** Ces derniers essaient de s'adapter en permanence à cela, mais les effets deviennent de plus en plus importants et coûteux [Nicolet,1990]. Cela se traduit par **une augmentation sérieuse du nombre des accidents de travail, de l'absentéisme, des maladies professionnelles, mais aussi une dégradation de la qualité et de l'efficacité de la production** [Rahimi,2000; Amell et al.,2001; Bellemeare,2002; Imbeau,2003 ; Shikdar,2003].

En effet, les nombreuses statistiques réalisées par les différents organismes et entités préoccupés par la santé et la sécurité des salariés [CSPRP,2004; MASTS,2004] confirment les points énoncés et mettent encore plus en garde les entreprises concernées. C'est cela que nous allons montrer par la suite, à travers quelques exemples.

Les Accidents de Travail (AT) et les Maladies Professionnelles (MP), conséquences de l'exploitation des produits industriels

Les statistiques établies par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladies des Travailleurs Salariés (CNAMTS) en 2002 font apparaître **un nombre d'accidents graves du travail (47009)**, en augmentation de 9% par rapport à l'année précédente et **759 980 accidents du travail avec arrêt**, soit 3% de plus par rapport à l'année 2001 [Source : CSPRP,2004].

Les cas les plus nombreux sont les **maladies professionnelles (MP) qui représentent aujourd'hui une forte inquiétude pour les entreprises** [Bellemare,2001; Bellemare,2002; Harichaux,2003 ; Imbeau,2003]. En effet, la CNAMTS met en évidence **un nombre de 34517 MP déclarées, constatées et reconnues pendant l'année 2001**, représentant une hausse de 14,5% par rapport à l'année 2000 [Source : CSPRP,2004].

Les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS)

Les statistiques montrent en particulier une amplification importante des ***"maladies professionnelles péri-articulaires"*** reconnues également sous les termes de ***Troubles Musculo-Squelettiques (TMS)*** *ou "**Pathologies d'hypersollicitation"*** [Cail et al,2000; Bourgeois,2000; CSPRP,2004]. Elles sont dénommées "*Cumulative Trauma Disorders"* aux USA, "*Repetitive Strain Injuries"* en Grande-Bretagne, "*Occupational Overuse Syndrome"* en Australie et en Nouvelle-Zélande et *"Lésions Attribuables aux Travaux Répétitifs"* au Québec [Simoneau,1996; Bernard,1997; Kuorinka,1998; Guangyan,1999; Cail,2000; Westgaard,2000; Ammel,2001; Malchaire,2001a-b-c; Piette,2001; Aptel,2002; Buckle,2002; Imbeau,2003 ; Punett,2004 ; Denis,2005].

Selon *le Service Statistique de la Commission Européenne (EUROSTAT)*, **les TMS sont le problème de santé au travail le plus répandu en Europe:** en 1999, 4,1 millions de travailleurs ont souffert de ce type de maladie, ce qui représente ***53% des MP déclarées dans les pays de l'Union Européenne*** [sources : CSPRP,2004; MASTS,2004]. La France est aussi très touchée par **les TMS qui sont chiffrées à 25674 en 2001, en progression de 14,6 % par rapport à l'année 2000**. La gravité de ce problème est d'ailleurs très bien montrée par la figure I.1 qui présente de manière comparative *l'évolution presque exponentielle du nombre total des maladies professionnelles MP et du nombre des troubles musculo-squelettiques TMS (affections péri-articulaires et lombalgies), maladies déclarées et reconnues en France pendant la période 1996 – 2001* [source : CSPRP, 2004].

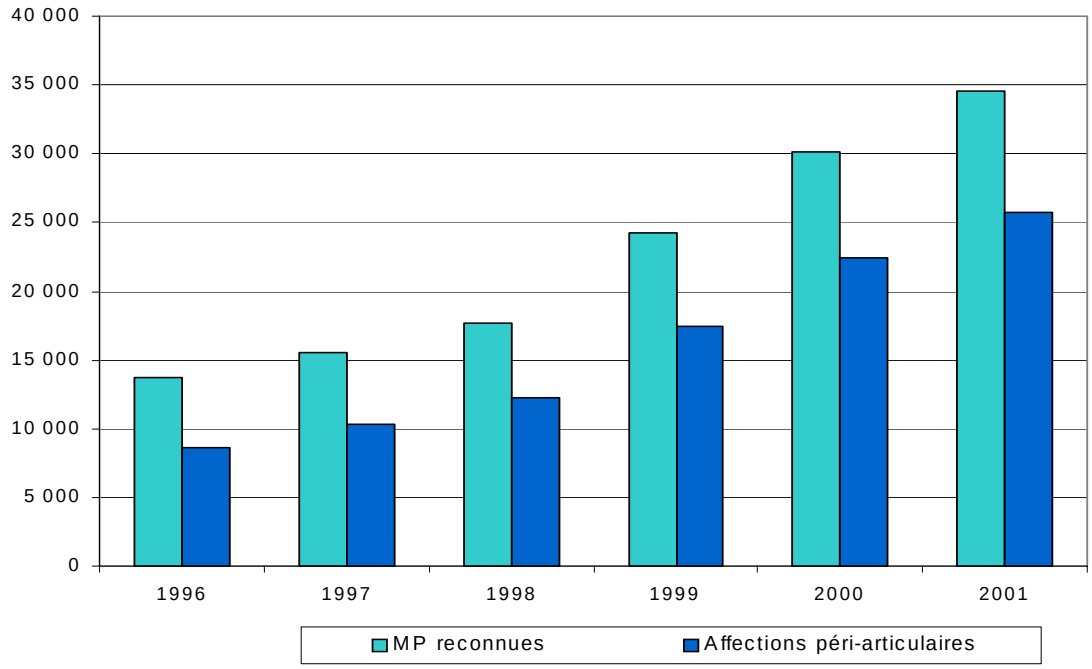


Figure I.1 Evolution des MP et des TMS en France [source CSPRP, 2004]

Les pathologies des TMS

Les TMS recouvrent différentes maladies et concernent plusieurs segments corporels et articulations du corps humain : **colonne vertébrale** (*cervicalgies et dorso-lombalgies*), **épaules** (*périarthrite scapulo humérale*), **coudes** (*épicondylites et épitrochléite*), **poignets** (*syndrome du canal carpien*) et **doigts** (*arthroses*). Dans le monde industriel français, **les plus connues sont les tendinites, les lombalgies, le syndrome du canal carpien (SCC),...** [Roquelaure,2003]. Celles-ci se trouvent regroupées en plusieurs *tableaux du Régime Général de la Sécurité Sociale*, ainsi (Cf. Annexe A1) : **le tableau n° 57** (le SCC), **le tableau n° 69** (*Affections dues aux vibrations*), **le tableau n° 79** (Lésions *chroniques du ménisque*), **les tableaux n° 97 et 98** (*Lombalgies et Dorsalgies*) [Monod,2003; CSPRP,2004; MASTS,2004].

Les domaines industriels touchés par les TMS

En ce qui concerne **la fréquence d'apparition,** les TMS touchent tous les secteurs professionnels et plus particulièrement *le secteur alimentaire, la métallurgie (automobile), la construction (les bâtiments et travaux publics), le transport, la santé, l'industrie du vêtement* [Haricaux,2003; CSPRP,2004; MASTS,2004]. Les professions qui semblent les plus exposés aux risques de TMS sont : hôtesses de caisse, travailleurs sur écran ou à un poste de contrôle, d'emballage, de tri, de montage - assemblage. [Harichaux,2003].

Les facteurs de risques de TMS

A l'**origine multi-factorielles** *(l'environnement de travail, l'organisation et la conception des postes de travail, les facteurs biomécaniques, les facteurs psychosociaux etc.)* [Buckle, 2002; Malchaire, 2001], ces pathologies affectent souvent des opérateurs soumis à des **travaux répétitifs** ou **monotones** ou **exposés longtemps à des vibrations d'outils ou d'équipement de travail**, ou lorsque ces travaux imposent des **postures extrêmes**, **des efforts excessifs** ou des **manutentions de charges** (cf. figure I.2) [Aptel,2000c; Bourgeois,2000; Westgard,2000; Cail,2000; Bellemare,2002; Buckle,2002; Imbeau,2003; Punnett,2004].

La figure I.2 issue des travaux du Cail et al. (2000), met en évidence une première classification des facteurs de risque, d'une part **les facteurs endogènes** liés à "l'équation personnelle" de l'opérateur (patrimoine génétique, histoire médicale) et d'autre part **les facteurs exogènes** liés à l'activité professionnelle et/ou extra – professionnelle. La deuxième classification concerne les facteurs de risque **directs** et **indirects.**

L'action de ces facteurs ne se fait pas individuellement, mais de manière combinée, à des niveaux variés et variables dans le temps [Cail et al,2000].

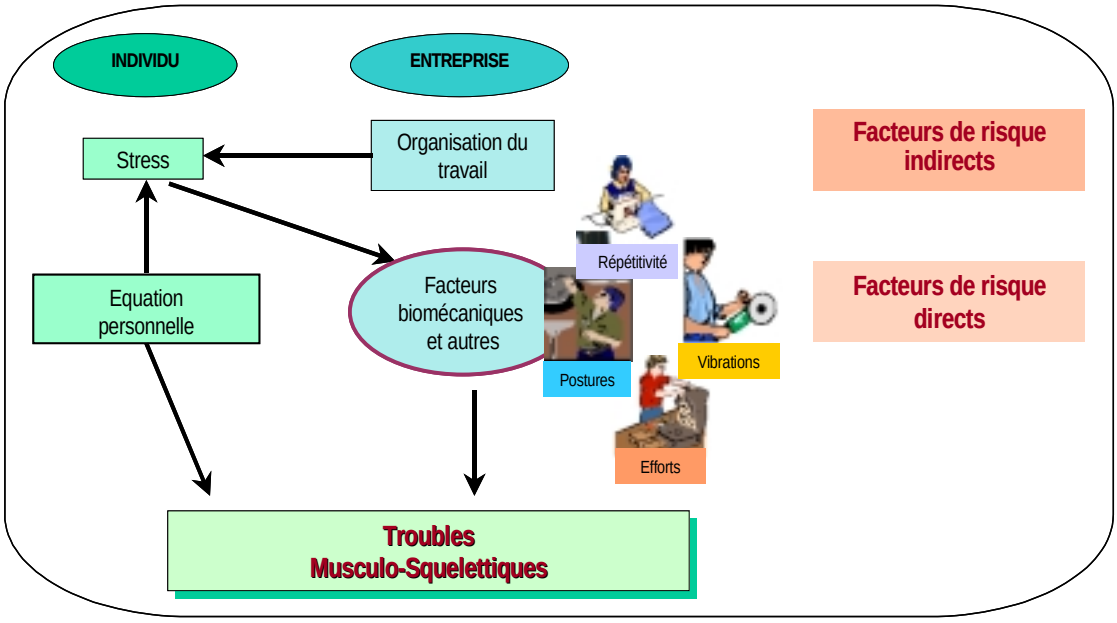


Figure I.2 Facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) [d'après Cail et al.,2000]

La combinaison de deux catégories évoquées précédemment permet pour ces facteurs une autre classification :

- **Facteurs endogènes directs :** antécédents médicaux, l'état de santé, l'âge, le poids corporel, d'autres facteurs liés au patrimoine génétique de l'individu, …
- **Facteurs endogènes indirects :** facteurs psychologiques, tel que l'anxiété, le stress, la dépression…
- **Facteurs exogènes directs ou primaires ou <u>Facteurs biomécaniques liés au travail</u>,** tels que les angles articulaires extrêmes, les postures pénibles, la force, les efforts excessifs, la répétitivité des gestes, la durée de l'activité, les contraintes mécaniques et d'autres facteurs
- **Facteurs exogènes indirects *:*** monotonie du travail, la pression du temps, un contenu appauvri du travail ou un sentiment de surcharge de travail,…

Parmi tous ces facteurs de risques des TMS, ***nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux facteurs exogènes directs (biomécaniques)***, ceux liés à un problème de développement, car c'est la conception qui est directement impliquée, par absence de prise en compte de données biomécaniques sur l'homme. En effet, les facteurs biomécaniques affectent davantage le milieu industriel. Les études actuelles montrent d'ailleurs qu'il n'existe pas de TMS sans hyper-sollicitation biomécanique [Cail et al, 2000].

Les coûts des TMS et la réaction des entreprises

En évolution constante, **les TMS coûtent de plus en plus cher aux entreprises,** pouvant mettre en cause leur compétitivité, voire leur pérennité. Ainsi, les statistiques de l'année 2001 mettent en évidence des *coûts en valeur de 258,748 millions d'euros* affectés aux affections périarticulaires, aux lombalgies et aux dorsalgies, représentant *une augmentation de 23,9% par rapport à l'année 2000* [CSPRP, 2004; MASTS, 2004].

La situation devient donc de plus en plus alarmante pour les entreprises. Par conséquent, le grand souhait actuel des industriels est **d'intégrer** la prise en compte de l'Homme, donc de l'opérateur, à la conception de leurs postes/systèmes de travail **en vue de détecter** les risques d'apparition de ces maladies professionnelles et de pouvoir agir dès que possible. Cela explique ainsi l'existence de la part de ces entreprises d'une **forte demande d'études** auprès des organismes et laboratoires de recherches, études qui visent ***la conception, la correction et l'aménagement de leurs postes/systèmes de travail en vue de mieux intégrer la dimension humaine.*** Les regards sont alors dirigés vers l'ergonomie qui a pour mission, en tant que Science Humaine et Sociale, de mieux considérer la fonction d'usage dans le processus de conception de ces postes/systèmes de travail et ainsi d'apporter de la valeur d'usage.

Avec une formation qui touche notamment le domaine de la conception de produits, mais aussi celui de l'ergonomie, nous nous positionnons parmi les chercheurs qui essaient de répondre aux demandes des entreprises, donc de les aider à améliorer leurs processus de conception à travers l'ergonomie. Nous souhaitons ainsi définir pour ces entreprises une meilleure méthodologie de conception, celle qui leur permettra de concevoir des produits respectant à la fois les futurs utilisateurs, mais aussi les opérateurs qui participent à leur réalisation. Pour ce faire, nous est nécessaire d'étudier le processus actuel de conception de produits et cela fait l'objet du paragraphe suivant.

I.3 Processus actuel de conception de produits

Nous avons constaté précédemment la gravité des problèmes posés par certains produits lors de leur usage/exploitation par les utilisateurs/opérateurs. De plus, il est facile de noter qu'à l'origine de ces problèmes, le processus de conception de ces produits est souvent impliqué car il n'intègre pas bien le facteur humain. Quelles sont les causes de cette mauvaise intégration ?

Devenu une thématique actuelle de recherche et de développement, le processus de conception suscite un grand intérêt de la part des industriels [Ciccotelli,1997]. Considérée longtemps comme une

activité pure de création difficilement maîtrisable, la conception fait actuellement l'objet de toutes les attentions, de la part de spécialistes des Sciences Humaines et Sociales et des Sciences pour l'Ingénieur qui cherchent à formaliser la représentation et à améliorer "les anciens modèles" [Lissandre,1990; Calvez,1990; Quarante,1994; Bossard,1997; Ciccotelli,1997; Kolski,1997; Pomian,1997; Bocquet,1998; Pahl and Beitz,1999; Duchamp,1999; Sagot,1999; Marsot,2002].

Parmi les nombreuses définitions de la conception, nous retenons celle proposée par Lissandre qui considère la conception comme *"une méthode, car cela propose une démarche cherchant à définir l'ordonnancement de toutes les activités à mener à bien pour atteindre un objectif final."* Liée directement à cela, *"une technique est un procédé permettant de réaliser une ou plusieurs de ces activités"* et selon Lissandre, *"une méthode peut donc demander l'emploi de plusieurs techniques "*[Lissandre,1990].

Sur la base de cette définition, la méthode de conception peut être assimilée à une démarche qui réunit un ensemble d'activités, d'acteurs et de tâches, à organiser au mieux pour transformer un concept en un produit [Marsot,2002]. La réalisation de ces différentes activités implique donc l'utilisation de différentes techniques et outils, tels que des normes, des questionnaires, des logiciels, des outils d'analyse, etc.

Ainsi, la caractérisation du processus de conception de produits nécessite la prise en compte de deux critères qui se veulent complémentaires :

- un premier qui est lié *au mode d'organisation* ***des activités*** *de conception* ;
- un deuxième qui concerne *le mode d'organisation* ***des acteurs*** *de la conception*.

I.3.1 Le mode d'organisation des activités de conception

Relativement à ce critère, il convient d'introduire **le cycle de vie du produit** pour lequel 4 phases sont classiquement déroulées : ***Pré-Existence, Naissance, Existence et Post-Existence***. Ces sont les quatre *phases qu'un produit doit suivre, à partir de l'idée de sa création et jusqu'à sa destruction ou sa disparition.* En effet, le cycle de vie représente depuis toujours un élément d'appui pour *la structuration des phases* et *des activités de conception*. Cela explique d'ailleurs la ressemblance de la plupart des démarches de conception développées jusqu'à présent. Cependant une différence se fait remarquer pour ces modèles de conception, notamment en début et en fin du processus [Marsot,2002].

La figure I.3 présente ainsi selon le cycle de vie d'un produit, les phases correspondant à la **démarche classique de conception**, que nous décrirons par la suite : ***Etudes de faisabilité*** *(Spécification),* ***Etudes Préliminaires*** *(Conception Générale),* ***Etudes détaillées*** *(Conception Détaillée)* et ***Réalisation***

*(Fabrication)***,** mais également les étapes de **post-conception** *(Utilisation, Evaluation, Extinction, Destruction ou Recyclage)*.

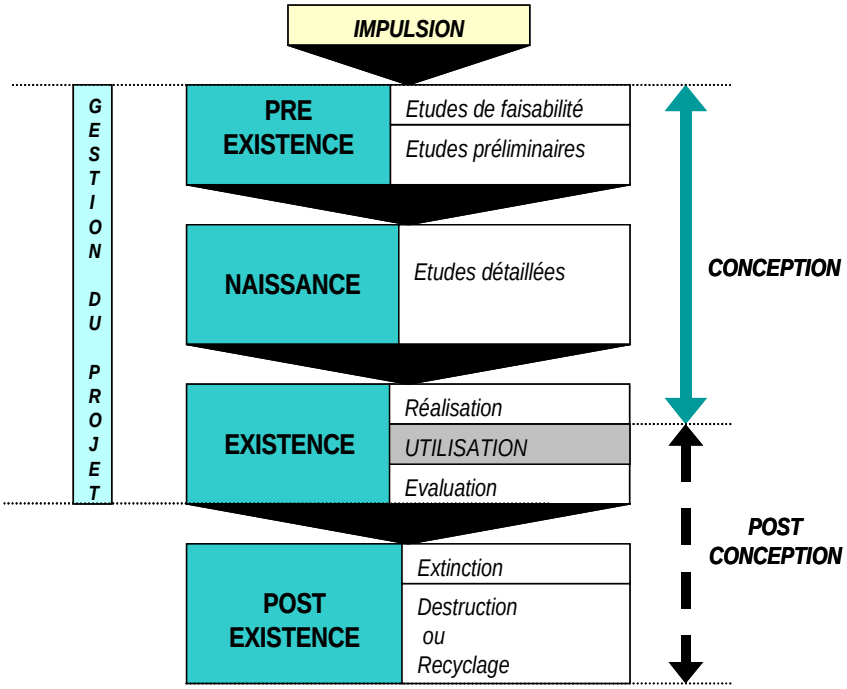


Figure I.3 Lien "Cycle de vie – Conception" d'un produit [d'après Quarante, 1994]

Ainsi, concernant ces étapes, nous pouvons prévoir que :

- *la première phase (**Etudes de faisabilité**),* se propose d'identifier le besoin, d'étudier le marché, la concurrence, d'étudier la faisabilité du projet de conception. Le besoin est ainsi traduit dans un document final intitulé "le Cahier des Charges Fonctionnel". Celui-ci représente, selon la norme AFNOR X-50-15, *"un document par lequel un demandeur exprime un besoin en termes de fonctions de services et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis les critères d'appréciation et leur niveau, chacun de ces critères étant assorti d'une flexibilité."* [AFNOR,1997]. Le Cahier de Charges Fonctionnel est réalisé par les acteurs de la conception à l'aide d'outils et de méthodes de conception spécifiques, dont la plus connue est l'Analyse Fonctionnelle [AFAV,1997].

- *la deuxième phase (**Etudes préliminaires),*** correspond à la recherche d'idées, à la créativité, permettant la proposition de plusieurs prè-concepts sous forme de schémas, croquis, dessins et, à la fin, de maquettes numériques. Solutions pour le futur produit, ces dernières sont soumises à des évaluations et hiérarchisations favorisant ainsi le choix d'un pré-concept acceptable. L'objectif est de passer d'un cahier des charges fonctionnel à un cahier des charges concepteur, destiné évidement au concepteur.

- *la troisième phase* – ***Etudes détaillées :*** a pour rôle de bien définir d'un point de vue technique (choix de matériaux, fabrication, assemblage,…) le produit à concevoir, en s'appuyant sur le pré-concept numérique retenu lors de la phase précédente et en vue de préparer la réalisation du prototype. Le résultat consiste en effet dans la définition d'un dossier produit, matérialisable par la suite en "Prototype".

- *la quatrième phase* ***– Réalisation :*** permet d'effectuer des boucles de "conception – évaluation – validation" du prototype final à l'aide des utilisateurs potentiels. Ces derniers apportent des informations complémentaires liées à la mise en œuvre du produit et à la sécurité d'utilisation.

Les phases présentées ci-dessus correspondent à la "conception pure", depuis l'analyse et l'identification du besoin jusqu'à la validation du prototype par les utilisateurs. Le prototype retenu passe ensuite dans *les phases d'industrialisation, de la présérie, de la série…*
Il est important de rappeler ici la diversité des activités de conception intégrant les phases évoquées, ainsi que la multitude de méthodes, techniques et outils de conception qui s'y associent (Méthodes de créativité, Méthodes d'Analyse Fonctionnelle et d'Analyse de la Valeur, Outils de modélisation 2D et 3D; Outils de maquettage et prototypage,…) [AFAV,1997; Marsot,2002].

D'une conception linéaire vers une conception en spirale

Il convient de préciser que la démarche classique de conception a évolué dans le temps selon le cycle de vie du produit pour lequel plusieurs modèles on été développés [Lissandre,1990; Calvez,1990; Ciccotelli,1997; Kolski,1997; Pomian,1997; Marsot,2002]. Ainsi, il y a eu d'abord **le cycle de vie en cascade** (Figure I.4 a) suivi par **le cycle de vie en cascade avec retour** (Figure I.4 b) et ensuite **le cycle de vie en "V"** (Figure I.4 c).
Le modèle en "V" propose une amélioration *des modèles en cascade*, ces derniers favorisant une ***conception linéaire*** où une phase utilise les données issues de la phase précédente. Cette amélioration est perceptible au niveau des *étapes descendantes de spécification - conception* qui sont liées horizontalement à celles *ascendantes de la réalisation*, à travers des *activités de vérification et d'évaluation du projet* [Calvez,1990; Marsot,2002]. En effet, le point fort du modèle en "V" est représenté par l'obligation de prédire dans chacune des phases descendantes les moyens et les méthodes d'évaluation et de validation de la phase [Kolski,1997].
Les inconvénients du modèle de conception en "V", liés notamment aux discontinuités existant encore entre les phases de conception, donc aux problèmes qui restent non-résolus d'une phase à l'autre, ont

réclamé une évolution qui a été possible par l'intermédiaire du **modèle du cycle de vie en spirale**, qui sera présenté dans le paragraphe 1.4.3) [Lissandre,1990; Pomian,1997 ; Calvez,1990].

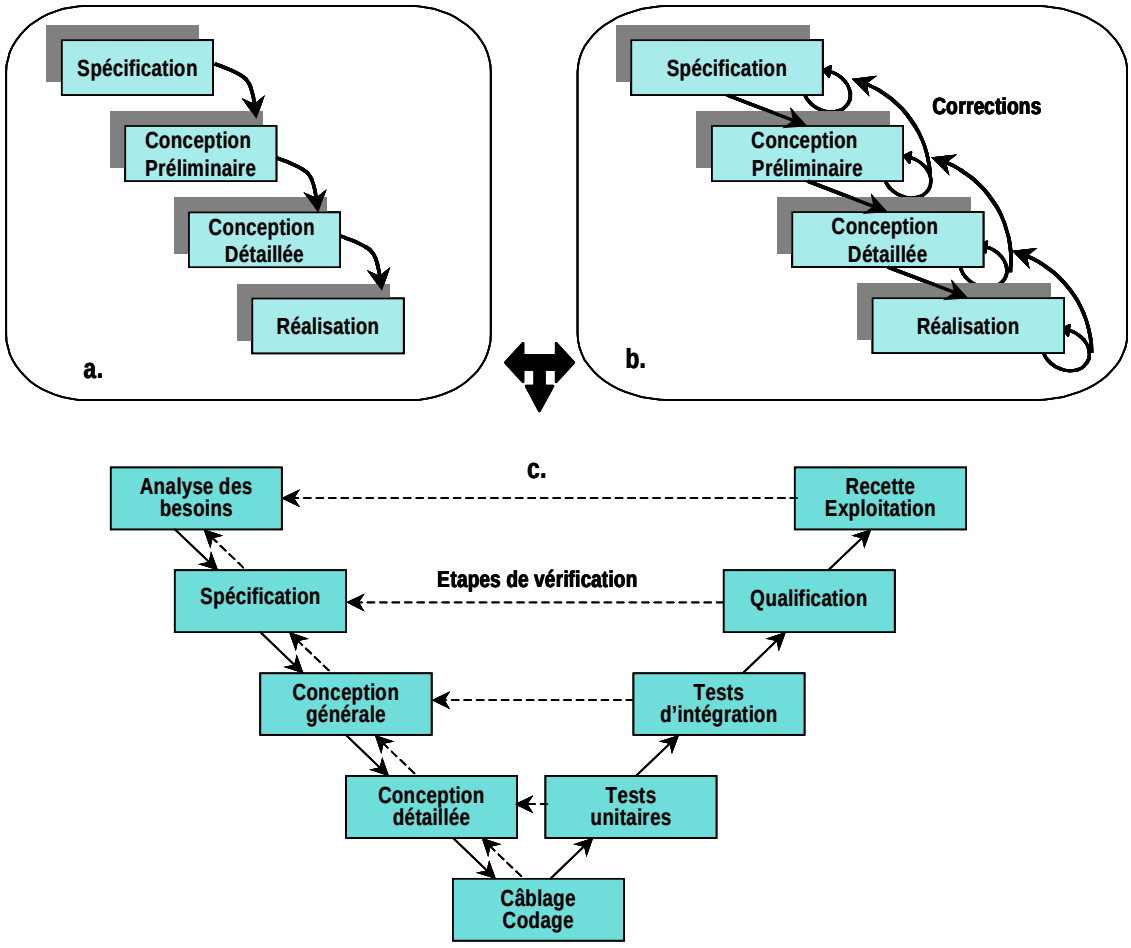


Figure I.4 Evolution du cycle de vie du produit [Sources : Lissandre,1990 ; Ciccotelli,1997; Pomian,1997; Marsot, 2002]

À l'opposé des autres cycles de vie dits "linéaires", celui-ci préconise la validation de chacune des phases de conception par les acteurs participant au processus, aspects sur lesquels nous reviendrons. Ce modèle "en spirale" guide alors de plus en plus l'organisation des activités de conception au sein des entreprises, favorisant surtout la diminution des coûts, mais également des délais de production.

Après avoir passé en revue *le mode d'organisation des* ***activités de conception***, il convient de présenter par la suite *l'évolution du mode d'organisation* ***des acteurs de la conception*** [Marsot, 2002].

I.3.2 Le mode d'organisation des acteurs participants à la conception

Ainsi, nous rappelons **l'approche de conception traditionnelle, déjà évoquée,** caractérisée par des activités de conception qui s'effectuent en mode séquentiel. Cette manière d'organisation favorise le travail individuel et limité au domaine de spécialité de chacun des acteurs de conception [Marsot, 2002]. L'organisation des acteurs est dictée en effet par les étapes du cycle de vie du produit à concevoir. C'est une démarche de conception qui a été longtemps utilisée par les entreprises, mais qui s'utilise à présent de moins en moins. Ainsi, des ***changements organisationnels importants*** se produisent de plus en plus dans les entreprises, traduisant notamment un passage du processus de ***conception séquentiel, traditionnel*** de produits, vers un processus ***concourrant***, ***simultané voire intégré*** [Bossard,1997; Garro,1997; Pomian,1997; Blanco,1998].

En effet, préoccupée par l'optimisation en terme de **qualité, coûts, délais**, mais aussi de la **valeur d'usage** des produits qu'elle offre sur marché, l'entreprise actuelle doit s'intéresser à tous les éléments qui peuvent participer et contribuer à ces objectifs. Pour ce faire, l'entreprise doit intégrer de plus en plus les phases de conception et de production (fabrication) et encore, d'autres phases situées en aval du cycle de vie de produits (après-vente, recyclage ou destruction des produits). Le processus de développement devient ainsi le résultat d'interactions et d'itérations entre plusieurs processus de conception : **conception de produits, conception de processus de production, conception des activités, ...** [Duchamp,1989; Aoussat,1998; Truchot,1998; Perrin,2001]. Il devient de plus en plus pluridisciplinaire, car de nouveaux acteurs qui intervenaient jusque là dans les phases en aval de la conception sont aujourd'hui sollicités en amont du processus. Ces "nouveaux concepteurs" sont encouragés à exprimer le plus tôt possible leur point de vue sur l'artefact, le futur produit [Beguin,1997].

Des **équipes - projet** réunissent ainsi différents **acteurs métiers présents en interne** (*spécialistes en ingénierie, design, représentants de la fabrication, de la maintenance, du marketing, de l'économie, de l'ergonomie, de la qualité, sûreté de fonctionnement ...)* et parfois même **en externe** *(partenaires, prestataires, fournisseurs, clients,...)* [Duchamp,1989; Aoussat,1998; Ngassa et Truchot,1999]. Les nouvelles phases de conception et les nouvelles disciplines introduites par l'intervention des "nouveaux acteurs", complexifient de plus en plus le processus de développement de produits et les moyens de production associés, dont l'entreprise. Et sa manière de coordonner et de maîtriser les fortes interactions qui existent entre ces différents acteurs a une influence directe sur les produits qu'elle propose, ainsi que sur son profit [Tiger,1998].

Selon Aoussat, la conception doit être perçue aujourd'hui comme *"une discipline horizontale dans laquelle la maîtrise des points de rencontre avec des disciplines carrefour est indispensable "* [Aoussat, 1998; Duchamp,1999] (cf.figure I.5).

L'auteur considère qu'il existe trois types de disciplines qui participent au processus de conception. Il s'agit des **disciplines classiques – propres à l'ingénieur** *(la mécanique, les sciences des matériaux, l'informatique, l'électronique,…)*, **des disciplines nouvelles** *(sécurité, qualité, fiabilité,…)* et des **disciplines carrefours** *(les sciences du comportement, la psychologie, la psychosociologie, le marketing, le design, la créativité, l'ergonomie,…)* [Aoussat,1998].

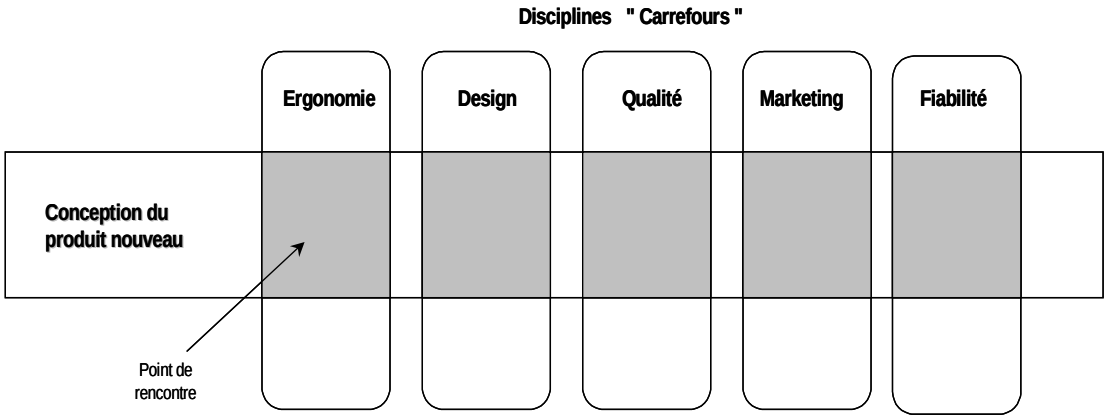


Figure I.5 Conception de produits - Carrefour de disciplines [d'après Aoussat,1998]

Ces dernières traversent les autres disciplines appartenant au processus de conception, permettant ainsi aux différents acteurs de se croiser et de confronter les contraintes spécifiques à leurs métiers. Et ces confrontations dénommées "points de rencontres" ne sont pas toujours faciles. En effet, le processus de conception est considéré comme *"un lieu de tension entre un objectif commun et une grande hétérogénéité d'objectifs, de compétences, de statuts, de positions hiérarchiques, d'intérêts, de valeurs,…"* [Carballeda,1997]. D'origines multiples, les acteurs de la conception ont souvent du mal à faire converger leur travail. La collaboration de ceux-ci devient de plus en plus laborieuse, car leur objectif n'est plus seulement de concevoir des produits de qualité dans les plus brefs délais et à coûts réduits, mais également de prendre en compte l'évolution des besoins des utilisateurs de ces produits.

Malgré les nombreuses recherches faites pour développer des méthodes et outils transversaux, favorisant le travail collectif et en parallèle des différents acteurs - métiers, la conception montre, à travers les produits qui en découlent, encore beaucoup d'imperfections. Parmi celles-ci, on peut citer **la difficulté de coopération de l'ergonome et du concepteur**, sujet qui suscite de plus en plus l'intérêt scientifique des chercheurs [Maline,1994; Beguin,1997a; Beguin,1998; Fadier,1998; Grosjean,2000; Guerrin,2001; Garrigou,2001; Bellemare,2001; Hasan,2002; Marsot,2002; Montreuil et al,2004].

Selon ces nombreux travaux de recherches, l'ergonome, ainsi que nous aurons l'occasion d'y revenir, est **un fournisseur de données et de connaissances sur le fonctionnement de l'Homme**, mais a aussi de plus en plus une place, un rôle de **"co-concepteur"** [Sagot,1999; Beguin,2004], car il intervient lors de la conception pour contribuer à l'amélioration des produits de grande diffusion ou industriels, en termes de confort, santé et sécurité pour l'utilisateur/opérateur [Garrigou,1995]. Et cette mission n'est pas facile face à un processus de conception en pleine mutation et complexification. La réduction constante de la durée du processus de conception, la tendance à la restructuration des services internes de conception au sein des grandes entreprises, les nombreuses contraintes de conception (investissement, protection d'environnement etc.), la mise en œuvre des différentes méthodes de conception, etc., ne font *qu'alourdir l'intervention ergonomique et le processus de conception qui en découle.*

Toutefois, la nouvelle approche d'**ingénierie** dite **concurrante, simultanée, intégrée…** [Bossard,1997; Bocquet,1998; Tichkiewitch,1998; Deneux,2002], qui s'appuie sur des équipes multidisciplinaires de conception fonctionnant le plus possible de façon simultanée et intégrée, semble représenter un avantage pour l'ensemble des acteurs, et en particulier pour l'ergonome. En effet, le travail en équipe, l'organisation du travail de façon moins compartimentée et plus flexible et la possibilité d'établir des relations plus étroites avec les clients et les fournisseurs, devra faciliter la participation de l'ergonome dans le processus de conception. Mais, malgré cela, la **collaboration "ergonome – concepteur"** reste encore difficile au sein du processus de conception. Comme nous l'avons déjà rappelé, en raison de la diversité culturelle, la variété des connaissances, des savoirs-faire, et la divergence des opinions, **ces deux acteurs ont du mal à communiquer** [Fadier,1998; Grosjean,2000; Sagot,2003; Marsot,2004]. Et les effets de cette mauvaise coopération, collaboration, se ressentent en dehors du processus de conception, notamment au niveau des nouveaux produits déjà évoqués qui apparaissent sur le marché et qui ne sont pas toujours bien adaptés aux caractéristiques de l'Homme. Les **difficultés d'usage** qu'ils posent aux utilisateurs peuvent avoir de **graves conséquences**, car elles touchent, comme déjà indiqué, le confort, la santé et la sécurité de ceux-ci.

Il est facile de constater que la conception de produits reste encore, comme déjà évoqué, **"technocentrée",** centrée sur la technique oubliant ainsi l'Homme [Fadier,1998]. Participant alors encore "de loin" à la conception, l'ergonome essaie actuellement de mieux se positionner au sein du groupe projet et surtout par rapport au concepteur. Son objectif est une meilleure association de ses connaissances humaines à celles, techniques, du concepteur. C'est ainsi qu'une nouvelle approche de conception se développe. Il s'agit de **l'Ingénierie Centrée sur l'Homme** ou **l'Ingénierie Anthropocentrée, science d'innovation, de compétitivité,** apparue récemment comme réponse au

besoin d'intégrer les facteurs humains au cœur du processus de conception [Brime,1997; Bertin,1998; Brandt,2001].

Ingénierie Anthropocentrée

L'Ingénierie Anthropocentrée s'appuie sur plusieurs disciplines, dont **l'ergonomie, la psychologie, la sociologie, la physiologie**, pour analyser les perceptions et les comportements humains dans la vie quotidienne ou professionnelle, en vue d'améliorer la fonction d'usage de produits [Brime,1997]. A travers ces différentes connaissances, cette approche semble capable d'associer à la conception de produits des facteurs subjectifs liés **à la culture, à la psychologie, au contexte, aux capacités cognitives et au système perceptif** des futurs utilisateurs. L'objectif du processus de conception anthropocentrée est ainsi de créer et de proposer de nouveaux produits qui respectent les critères de sécurité, de santé, de confort,…des futurs utilisateurs auxquels ils sont destinés. Le processus de conception centré sur l'Homme vise encore mieux, car, à travers la fonction d'usage, il envisage de répondre, voire améliorer la démarche d'innovation des entreprises.

Malgré les nombreux travaux de recherches conduits par la littérature [Aoussat,1990; Arnould,1996; Brime,1997; Roussel,1996; Fadier,1998; Aoussat,1998 ; Duchamp,1999; Sagot,1999; Gomes,1999; Zwolinski,1999; Leborgne,2001], cette démarche d'innovation est encore assez limitée, car les difficultés de coopération des acteurs persistent et en conséquence les problèmes d'usage des nouveaux produits perdurent.

Persuadée de la gravité de ces problèmes pour la société actuelle, l'équipe de recherche dirigée par Monsieur Sagot, où notre recherche a été conduite, travaille sur cette problématique en essayant d'**apporter une aide** aux entreprises [Sagot,1999]. En effet, depuis plusieurs années, l'équipe SeT-ERCOS mène une partie de ses travaux de recherche sur l'intégration des facteurs humains dans la conception des systèmes de travail, à travers l'ergonomie [Sagot,1996a; Sagot et al.,1996b; Sagot et al.,1998; Sagot,1999; Gomes,1998; Zwolinski,1998]. C'est ainsi qu'elle a pu définir un processus de conception **coopératif et rétroactif** [Sagot,1999], processus qui se veut **de plus en plus "anthropocentré"**. Les cas concrets de conception dans lesquels ce modèle a été appliqué ont permis au fur et à mesure son évolution, notamment par l'intervention riche et "continue" de l'ergonomie. A ce jour, le modèle de conception, proposé par Sagot et al. [Sagot,2003], montre encore du potentiel, car des évolutions apparaissent possibles, notamment dans la direction d'une meilleure intervention ergonomique.

I.4 Vers une conception de produits de plus en plus anthropocentrée

Nous avons mis en évidence le caractère pluridisciplinaire de la conception et les difficultés qui apparaissent au niveau de la collaboration de certains des acteurs du processus, dont l'ergonome et le concepteur. Nous souhaitons montrer par la suite *la nécessité de faire évoluer le processus actuel de conception de produits vers un processus de plus en plus anthropocentré* et cela par une meilleure intégration de l'ergonomie.

Utilisant leurs compétences qui relèvent des domaines des Sciences Humaines et Sociales et des Sciences pour l'Ingénieur, et cherchant toujours à les développer, Sagot et ses collègues ont proposé **un processus de conception anthropocentrée** avec pour but d'aider les entreprises [Sagot,1999] :

- *à augmenter la performance et la fiabilité* des modes d'interactions Homme-Produit, Homme-Machine, Homme-Système,
- *à garantir la sécurité et la santé* des personnes.

En s'inspirant en particulier de la démarche définie par Aoussat [Aoussat,1998], et à l'appui des autres modèles de conception présentés par la littérature [Calvez,1990; Dejean,1992; Quarante,1994; Bocquet,1996 ; Pahl et Batz,1999], les auteurs [Sagot,1999; Gomes,1999; Zwolinski,1999] ont proposé un modèle présentant les activités de conception organisées de manière similaire à celles du "cycle de vie en spirale" que nous avons déjà évoqué (cf. figure I.6).

Dans ce modèle nous retrouvons les "phases classiques" de la conception que nous avons déjà présentées : *études de faisabilité, études préliminaires, études détaillées, réalisation (industrialisation), ainsi que* ***des étapes "clés" intermédiaires*** *(Cahier des Charges Fonctionnel, Avant-Projet/Préconcepts, Prototype et Pré-série).* Celui-ci montre ainsi *la progression des activités de conception et des résultats associés* qui sont en effet "*des états intermédiaires" du produit* à concevoir. Une succession de trois étapes, "**Evaluation - Validation – Optimisation"**, a pour but de souligner l'évolution du produit, de l'idée de création jusqu'à **la solution finale qui ne se veut pas optimale, mais plutôt acceptable** [Sagot,1999].

Relativement au ***mode d'organisation des activités de conception***, le processus est considéré comme étant **rétroactif**, car il prévoit la remise en cause des résultats de chacune des phases par rapport aux objectifs initialement définis pour l'étude. Pour ce faire, les auteurs se sont appuyés sur "**le modèle du cycle de vie en spirale"** [Lissandre,1990; Calvez,1990].

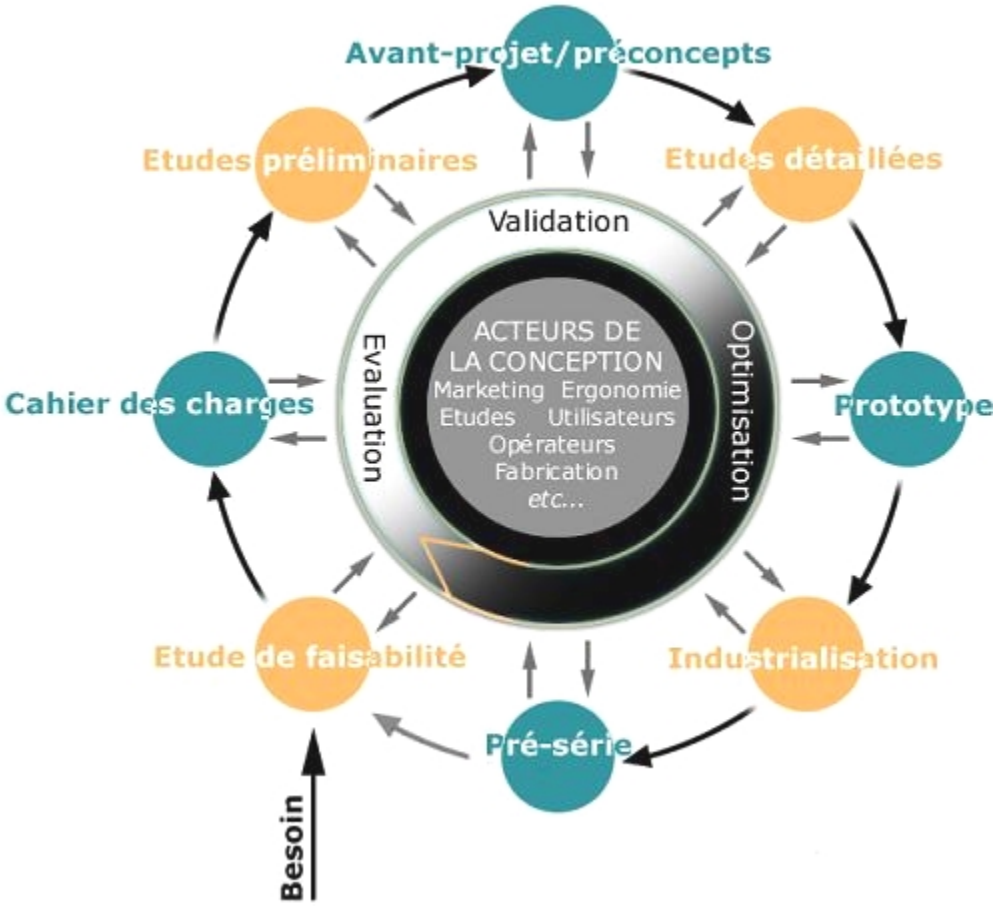


Figure I.6 Le processus de conception rétroactif et coopératif de produits [d'après Sagot,1999]

En ce qui concerne l'organisation des participants à la conception, ce modèle de conception se veut **pluridisciplinaire,** car plusieurs acteurs participent au processus: *ingénieurs, ergonomes, opérateurs, utilisateurs, responsables du marketing, etc*. C'est en même temps un processus **coopératif**, car il favorise la collaboration des différents acteurs de conception, le groupe de participants au projet étant placé au centre du modèle proposé [Sagot,1999].

Jusqu'ici, nous avons présenté essentiellement le côté "technico-économique" de ce modèle de conception et, à travers celui-ci, les aspects relevant du processus de conception "courant" des entreprises.

Il convient maintenant d'évoquer son côté "de plus en plus anthropocentré", celui qui permet, par l'intermédiaire de l'ergonomie, la prise en compte des facteurs humains dans la conception. Pour ce faire, il apparaît d'abord important de définir un peu plus la discipline "ergonomie". Ensuite, il sera nécessaire d'évoquer les travaux de la littérature relatifs à l'intégration de l'ergonomie à la conception de produits et de pouvoir positionner ce modèle par rapport à ces travaux. En effet, nous insistons sur la présentation de ce modèle, car il représente *le support de nos travaux de recherche*, celui *qui guide nos actions par la suite.*

I.4.1 L'ergonomie en tant que Science de l'Humain

Ainsi, le terme " ergonomie ", traduit de l'anglais " ***ergonomics ",*** dérive du grec *ergon* – travail et *nomos* – loi [Montmollin, 1995]. Il a été proposé et adopté officiellement en 1949 à Oxford, lors de la création de la première société anglaise d'ergonomie " Ergonomics Research Society ", qui réunissait des ingénieurs, des physiologistes et des psychologues, avec pour objectif "d'adapter le travail à l'homme ". Plusieurs recherches sont faites depuis dans ce sens, permettant aux spécialistes d'avoir une vision plus large sur le concept d'ergonomie et favorisant la formulation des différentes définitions [Noulin,1992; Daniellou,1995; Sagot,1996; Roussel,1996; Amalberti,1997; Rabardel,1998; Gate,1998; Wilson,2000; Monod,2003; Falzon,2004]. Parmi celles-ci, nous retenons la définition proposée récemment par l'International Ergonomics Association, définition qui constitue aujourd'hui la référence internationale.

Ainsi, l'IEA définit l'ergonomie ou "*l'étude des facteurs humains"* comme étant "*la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composants d'un système, et la profession qui applique principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes.*
Les praticiens de l'ergonomie, les ergonomes, contribuent à la planification, la conception et l'évaluation des tâches, des emplois, des produits, des organisations, des environnements et des systèmes en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes." [IEA,2000].

L'ergonomie se dissocie, selon l'IEA, en trois composants : **ergonomie physique**, **ergonomie cognitive**, **ergonomie organisationnelle** [IEA,2000 cité par Falzon,2004].
Ainsi, **l'ergonomie physique** est dédiée *aux caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques de l'homme* dans leur relation avec l'activité physique [Falzon,2004]. Cette composante de l'ergonomie, qui nous intéresse particulièrement, analyse notamment *les postures au travail, l'effort à la manutention des objets, la répétitivité des gestes, l'organisation des postes de travail, etc.*

L'ergonomie cognitive s'intéresse *aux processus mentaux (la perception, la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices)* et notamment à leurs effets sur *les interactions Homme – Composantes d'un Système* [Falzon,2004]. Il s'agit par exemple de *l'analyse de la charge mentale, de la prise de décision, du stress, etc.*

L'ergonomie organisationnelle se préoccupe de *l'optimisation des systèmes socio-techniques (structure organisationnelle, règles et processus)* [Falzon,2004]. Elle a pour cible *la communication, la gestion des ressources des collectifs, la conception du travail et des horaires de travail, etc*

Les trois composantes évoquées représentent en effet **les domaines de spécialisation de l'ergonomie.** L'intervention ergonomique lors de la conception est alors plus complexe qu'elle n'y paraît. Elle est possible par l'intermédiaire des ergonomes, spécialistes dans les trois domaines mentionnés, qui doivent se réunir pour participer auprès des concepteurs à la définition de produits qui respectent au mieux *les caractéristiques et les capacités humaines des futurs utilisateurs.*

Il convient d'évoquer par la suite, à travers la littérature, les nombreux travaux portant sur l'exploration des connaissances spécifiques à l'ergonomie et leur exploitation dans la conception de produits [Aoussat,1990 ; Wisner,1995; Arnould,1995; Daniellou,1995; Roussel,1996; Amalberti,1997; Beguin,1997; Guerrin,1997; Maline,1997; Pomian,1997; Aoussat,1998 ; Fadier,1998a,b; Sagot,1999; Leborgne,2001; St-Vincent,2000; Grosjean,2000; Bellemare,2001; Garrigou,2001; Bellemare,2001; Crosato,2001; Wilson,2001; Marsot,2002; Imbeau,2003; Beguin,2004; Hess,2004; Montreuil,2004 ; Denis,2005]. Ces travaux de recherche montrent, à travers *les différentes démarches ergonomiques de conception* et *modèles de conception ergonomique qu'ils proposent*, les différents rôles de l'ergonome, sa manière d'intervenir et ses apports pour la conception de produits. Nous allons ainsi présenter cette intervention, avec pour objectif d'identifier ses manques et de pouvoir définir la manière dont cela devra évoluer.

I.4.2 L'intervention ergonomique lors de la conception de produits

Il apparaît évident, comme pour toute autre intervention conditionnée par son milieu d'action, que l'intervention ergonomique dans la conception de produits dépend toujours du "monde de la conception": de l'entreprise, du réseau d'acteurs, des objets à concevoir, des outils et moyens disponibles, etc. De ce fait, malgré les diverses et nombreuses recherches évoquées, *il est impossible à ce jour de définir un modèle universel standard d'intervention ergonomique applicable à la conception de tout produit*. C'est pour cela qu'il existe aujourd'hui une variété de *"méthodologies de conception de produits"* dans lesquelles *l'ergonomie intervient de façon différente*.

La démarche ergonomique basée sur trois approches - Garrigou et col.,2001

Ainsi, dans leurs travaux relevant notamment de la conception des produits industriels, Daniellou et Garrigou [Garrigou,1992; Daniellou,1995] ont développé **une approche "centrée sur les opérateurs"**. Celle-ci nécessite de rassembler les concepteurs et les opérateurs dans des groupes de travail et de faire favoriser la confrontation de leurs représentations de travail. Ce modèle permet ainsi de définir de nouvelles situations de travail intégrant certaines des caractéristiques fonctionnelles des opérateurs.

Le modèle a évolué depuis, permettant la proposition d'une démarche d'intervention ergonomique qui s'articule aujourd'hui autour de trois approches (figure I.7): ***descendante, ascendante et par simulations*** [Garrigou et coll.,2001].

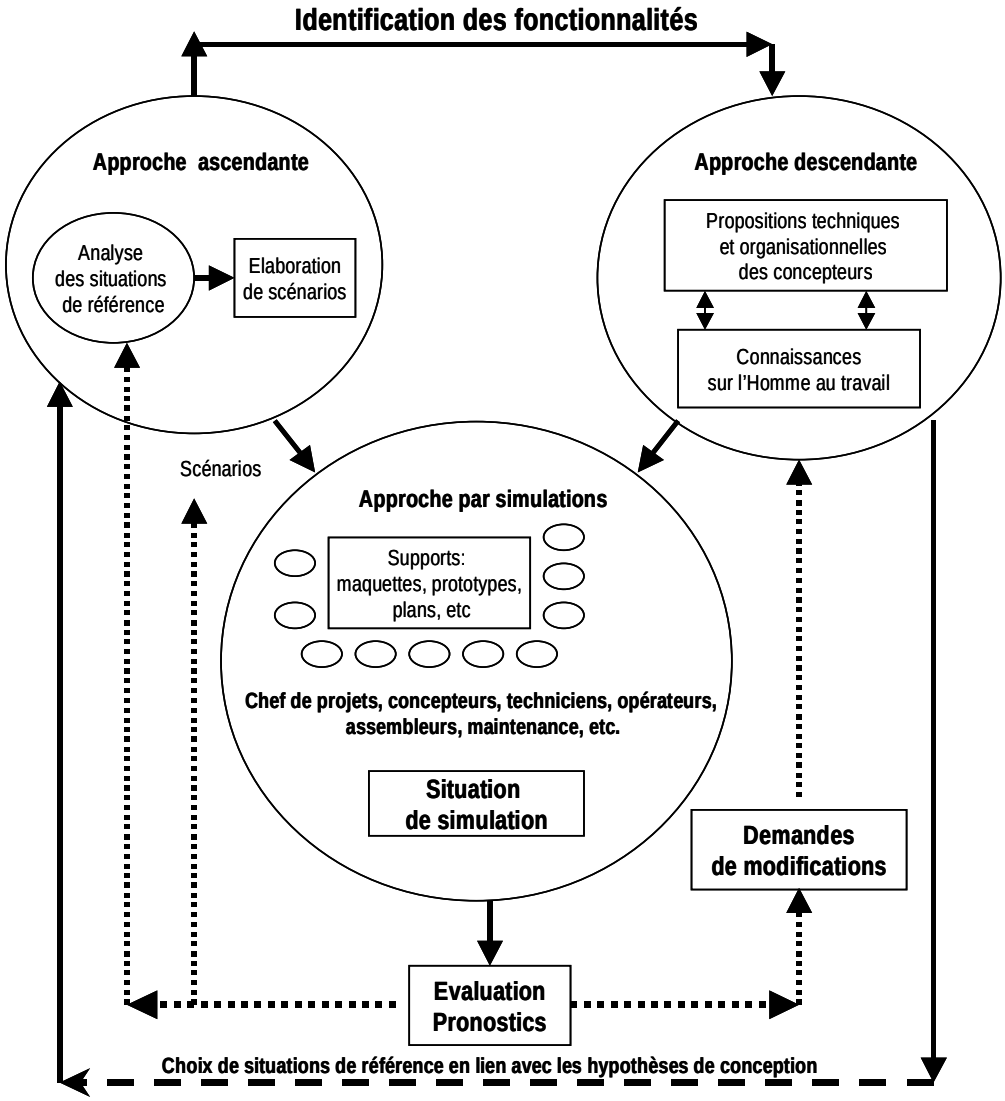

Identification des fonctionnalités
Approche ascendante
Analyse des situations de référence
Elaboration de scénarios
Approche descendante
Propositions techniques et organisationnelles des concepteurs
Connaissances sur l'Homme au travail
Scénarios
Approche par simulations
Supports: maquettes, prototypes, plans, etc
Chef de projets, concepteurs, techniciens, opérateurs, assembleurs, maintenance, etc.
Situation de simulation
Demandes de modifications
Evaluation Pronostics
Choix de situations de référence en lien avec les hypothèses de conception

Figure I.7 La démarche ergonomique qui articule trois approches [Source: Garrigou,2001]

L'approche descendante considère que l'ergonome interagit avec les acteurs du processus de conception et notamment avec *les représentants de la Maîtrise de l'Ouvrage* pour contribuer à l'enrichissement du Cahier des Charges Fonctionnel, document que nous avons déjà évoqué. En plus des données techniques et économiques qu'il contient pour le futur produit, ce dernier intègre ainsi les recommandations ergonomiques.

L'approche ascendante a pour but d'instruire des retours d'expérience issus de situations de référence. Elle permet l'élaboration de scénarios futurs qui alimentent ***l'approche par la simulation***. Cette dernière a pour objectif de faire de pronostics sur les situations futures.

Ainsi, cette démarche présente un intérêt pour la conception, car, par l'intermédiaire de ces trois approches, elle définit *des liens mais également des différences entre* ***les situations passées, actuelles et futures***, qui vont enrichir le processus. Elle permet ainsi la préparation des opérateurs aux activités futures de travail. De plus, elle agit sur les relations entre les *représentants de la Maîtrise d'ouvrage* et *de la Maîtrise d'œuvre*, entre les différents acteurs de conception, permettant d'aboutir à de nouveaux choix techniques, comme organisationnels.

Malgré les apports évoqués, cette démarche reste encore très centrée sur le métier d'ergonome, réclamant dès lors une amélioration notamment au niveau de l'articulation avec les phases du processus de conception.

La méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques – Roussel,1996

Une autre méthode est celle ***"de la formulation de principes de solutions ergonomiques"***, proposée par Roussel [Roussel,1996; Roussel,1997], qui est composée de trois étapes : *la formulation de problèmes, la formulation de solutions et l'évaluation des solutions* (figure I.8).

Ainsi, à l'appui d'un Référentiel Commun d'Usage (RCU), **l'ergonome participe en tant qu'acteur au processus de conception de produits**, notamment dans la phase de formulation de solutions pour le futur produit. *"Mode de représentation intermédiaire"* entre les outils spécifiques à l'ergonome et ceux des autres acteurs de la conception, dont également les concepteurs, le Référentiel Commun d'Usage joue un rôle de "traducteur" des informations ergonomiques. A travers *"un ensemble de règles"* et *"un ensemble d'exemples"* qu'il contient (figure I.8), cet outil permet ainsi à l'ergonome de participer, dans un moment important de la conception, ***à la formulation des principes de solutions ergonomiques***.

Cependant, l'intervention de l'ergonome ne doit pas se résumer à cette étape de la conception. Il semble alors indispensable de construire d'autres modèles de Référentiels Communs d'Usage en vue de faciliter la collaboration "*ergonome - concepteur"*, tout au long du processus de conception.

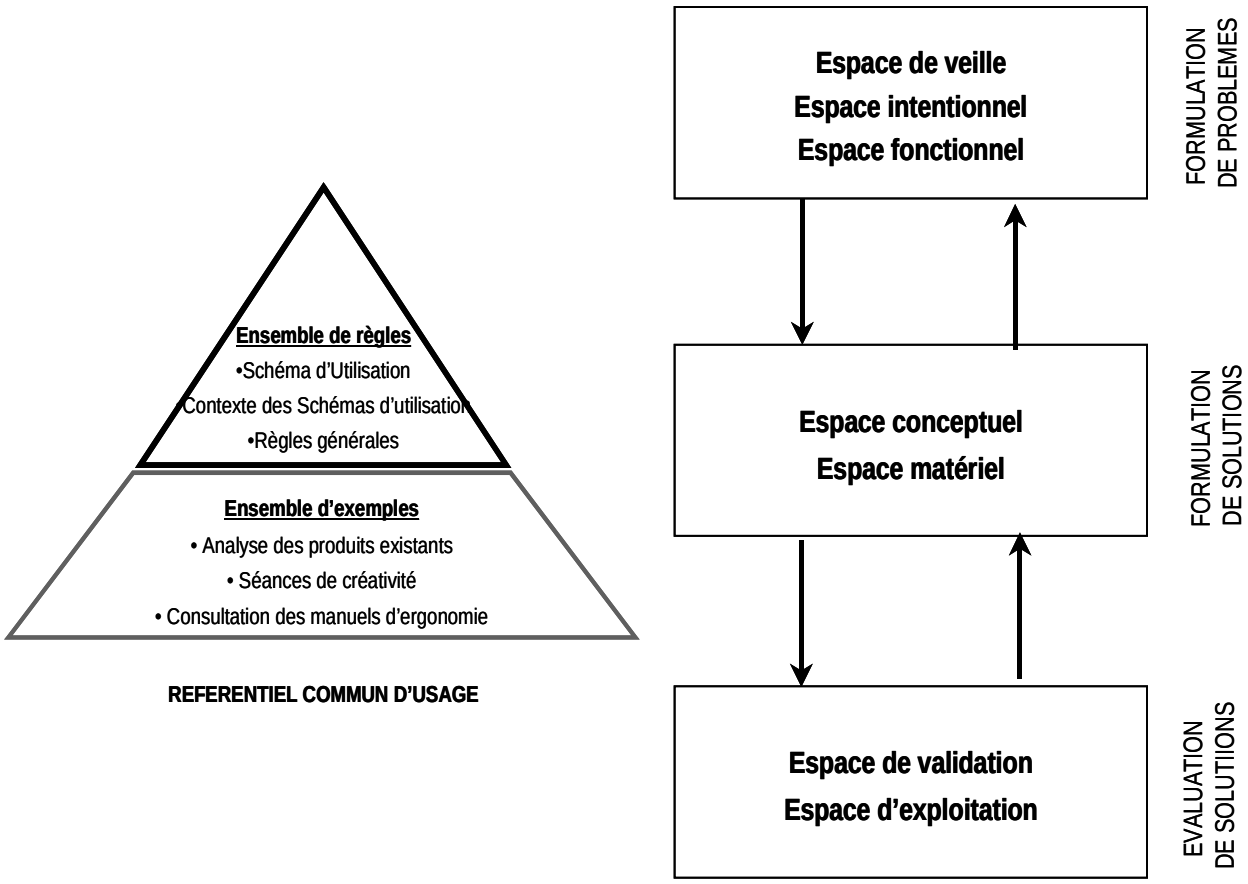


Figure I.8 Méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques [d'après Roussel,1996]

Ainsi, dans la continuité et complémentarité des travaux de Roussel, les recherches conduites par Leborgne [Leborgne,2001] ont favorisé la mise en place d'une méthodologie de conception anthropocentrée de produits de grande diffusion qui s'appuie sur un Référentiel Commun d'Usage enrichi. Ainsi, l'auteur a pu élargir la sphère d'utilisation du RCU sous trois aspects:

- extension vers les aspects sociologiques de l'usage;
- extension vers les autres acteurs du processus: distributeurs, utilisateurs,
- extension vers les phases en aval du processus de conception (phase de validation de solutions) et même plus vers l'extérieur (phase de distribution et d'utilisation du produit).

La méthodologie de conception qui intègre l'ergonomie – Marsot,2002

Marsot [Marsot,2002; Marsot,2004] montre, à travers ses travaux de recherche, la nécessité de construire et d'intégrer d'autres Référentiels Communs d'Usage dans le processus de conception de produits. "Objets intermédiaires de la conception", [Jeantet,1998; Boujout,1998], notion sur laquelle nous reviendrons plus loin, ces Référentiels Communs d'Usage devront permettre, selon Marsot, une

meilleure coopération dans la conception, de tous les acteurs et à tout moment. Avec pour cible de faciliter surtout le travail en commun de l'ergonome et du concepteur, Marsot propose une *méthodologie de conception qui intègre l'ergonomie* à travers trois outils: *AFB (Analyse Fonctionnelle du Besoin)*, *QFD (Quality Fonction Deployment)* et *TRIZ (Théorie de la Résolution des problèmes innovants)* [AFAV,1997; Ngassa,2000; Marsot,2002]. Ainsi, ***l'Analyse Fonctionnelle***, méthode à caractère pluridisciplinaire, permet à ***l'ergonome de participer à l'élaboration des spécifications du produit à concevoir et à la formulation des attentes en matière d'ergonomie***. Elle aboutit au document que nous avons déjà évoqué, intitulé le *Cahier des Charges Fonctionnel du besoin (CDCF).*

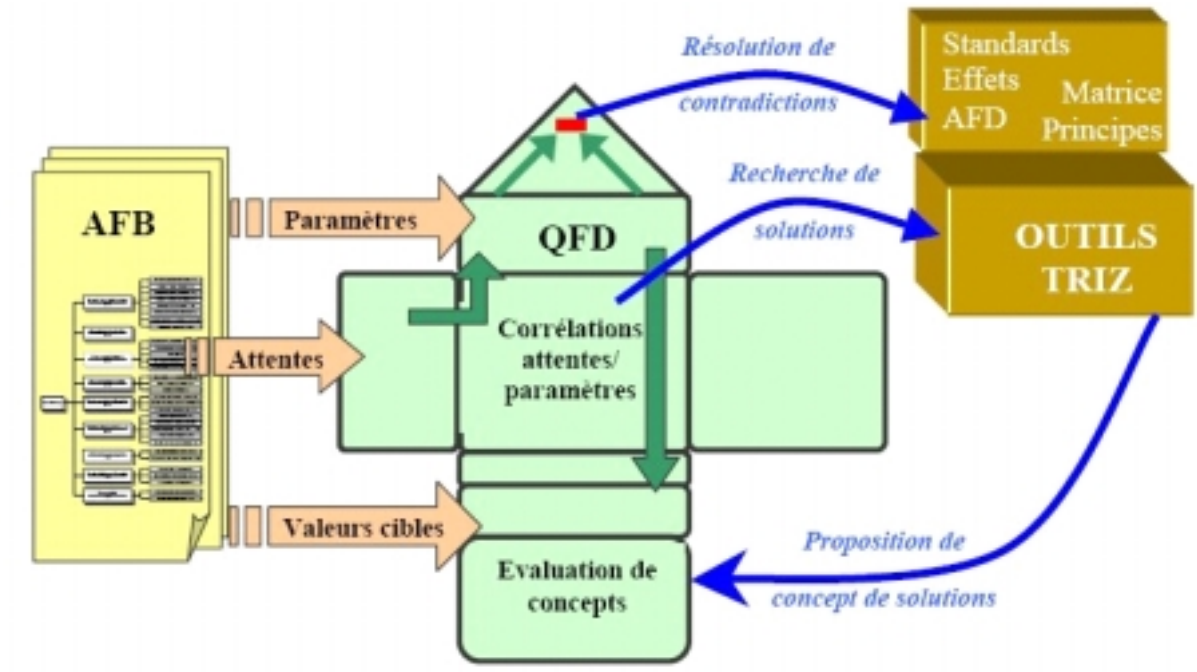


Figure I.9 Méthodologie de conception intégrant l'ergonomie [Marsot,2002]

La méthode QFD s'ajoute ensuite à la démarche *pour "déployer" les attentes/besoins des utilisateurs (Les "Quoi") en paramètres relatifs à la conception du futur produit (les Comment").* Les matrices QFD résultant des corrélations *"Quoi – Comment",* jouent un rôle de RCU, car elles nécessitent la réunion des acteurs de la conception pour réaliser le lien *"attentes - paramètres de conception"* [Marsot,2005].

La méthode créativité TRIZ est utilisée par la suite pour *résoudre les contradictions* mises en évidence par "la maison de la qualité", support de la méthode QFD, *entre certains paramètres fonctionnels et des critères ergonomiques.*

Bien qu'il favorise l'intégration de l'ergonomie dans les phases amont de la conception, cet *enchaînement des trois méthodes reste très technique et pas toujours facile à appliquer*. Les trois

méthodes sont notamment des outils spécifiques aux concepteurs et nécessitent une compréhension par les autres acteurs de la conception. A cet égard, Roussel mentionnera qu'il est indispensable pour l'ergonome de connaître, de maîtriser et quelquefois d'appliquer les outils et les méthodes de la conception [Roussel,1997].

La démarche de conception ergonomique proposée par Duchamp et Aoussat

Une autre démarche est proposée par Duchamp et Aoussat [Duchamp,1999], avec pour cible une "**humanisation de l'innovation et de la conception".** Son point de départ est ***"le besoin exprimé"*** et l'ergonome est sollicité à ce moment pour analyser des situations existantes. L'intervention ergonomique se fait ainsi dès le début du projet de conception. Il s'agit dans ce cas d'une **ergonomie de conception**.

En effet, selon le moment de son intervention dans la transformation ou la conception de produits il existe deux approches: **ergonomie de conception** et **ergonomie de correction** [De Montmolin,1995; Monod,2003; Falzon,2004].

Ainsi**, l'*ergonomie de conception*** permet une intervention depuis le début et tout au long du processus de conception. Cette approche s'appuie sur l'analyse des "situations supposées" avec pour but de définir des recommandations pour le futur produit en cours de conception [Arnould,1995]. Il est évident que ces recommandations sont souhaitables en amont du processus de conception quand les modifications du produit sont aisées et possibles.

L*'ergonomie de correction* consiste dans l'analyse d'un produit existant, avec pour objectif de vérifier la concordance entre ses caractéristiques et les spécifications prévues dans les normes ergonomiques. La mise en œuvre des recommandations issues de cette analyse visant l'amélioration du produit étudié implique des coûts supplémentaires et parfois elle reste impossible.

Il est évident alors, à travers ces définitions, que ***l'ergonomie de conception*** *occupe une position prioritaire par rapport à l'ergonomie de correction,* notamment par l'aide qu'elle peut apporter aux entreprises dont l'objectif est de concevoir du premier coup des produits adaptés aux futurs utilisateurs/opérateurs.

Et selon la classification adoptée pour les produits en "produits de grande diffusion" et "produits industriels", nous distinguons alors deux concepts de l'ergonomie : ***l'ergonomie du produit*** qui s'intéresse aux interactions *"Utilisateur - Produit"* et ***l'ergonomie des systèmes de travail*** qui se préoccupe des relations *"Opérateur – Poste de travail".*

Le modèle de l'intervention ergonomique participative

L'intervention ergonomique devient aujourd'hui de plus en plus "participative". En effet, depuis un certain nombre d'années, la littérature met en évidence de nombreuses études qui portent sur **"l'ergonomie participative"** [St. Vincent et al.,2000]. Cela ne représente pas forcement une nouvelle approche, mais plutôt une évolution de plusieurs aspects : la société, les organisations, l'ergonomie et son rôle. Elle s'inspire à la fois du **courant anglo-saxon des facteurs humains** et de celui **francophone de l'analyse de l'activité.**

L'ergonomie des facteurs humains (*Humans Factors*) ou **l'ergonomie normative** avec une dominante américaine et britannique (***l'ergonomie anglo-saxonne***), s'intéresse au **composant humain**, plus précisément **aux caractéristiques humaines** *(anthropométriques, physiologiques, cognitives,…)* visant leur prise en compte à la re-conception ou conception des produits. Pour ce faire, elle dispose de normes et standards ergonomiques. Sa particularité provient du fait qu'elle s'appuie principalement sur le concept d'expérimentations au laboratoire [Rabardel,1998].

Apparue en France et en Belgique dans les années '50-'60, l'**ergonomie de l'analyse de l'activité** ou **ergonomie francophone** est centrée sur **l'activité humaine**, qu'elle soit **d'usage ou de travail**. Sa particularité par rapport à l'ergonomie anglo-saxonne consiste dans **l'analyse réelle de l'activité humaine**, qui s'appuie sur un travail de terrain. Les résultats de cette analyse ont pour même but de contribuer à la re-conception ou conception des produits [Rabardel,1998].

Sur la base de ces deux courants, l'**ergonomie participative**, selon St. Vincent, repose aujourd'hui sur la mise en commun et la confrontation des savoirs des ergonomes, d'opérateurs et de spécialistes techniques [St. Vincent et al.,2000]. Ainsi, dans ses recherches, l'auteur aborde la problématique de réduction des TMS à travers une démarche qui s'appuie sur la construction de nouvelles compétences et sur la mise en commun des savoirs de travailleurs et des concepteurs. Avant toute action, les personnes impliquées dans cette démarche doivent suivre une formation visant à s'approprier le transfert de connaissances et les méthodes d'analyse ergonomique [Wilson,2001]. De ce fait, l'entreprise concernée par une telle étude doit prévoir du temps et des moyens supplémentaires pour tous ces participants. Par ailleurs, une attention importante doit être accordée au choix des méthodes et outils d'analyse. La formation, en général de courte durée, peut apparaître difficile pour certains opérateurs [CESTP - ARACT,2002].

Ainsi, l'intervention ergonomique qui envisage une telle participation des salariés semble longue et parfois "risquée". Face à cela, d'autres méthodes d'intervention ergonomiques sont parfois préférables.

L'intervention ergonomique proposée par Fadier

Selon les travaux de Fadier [Fadier,1998], l'intervention de l'ergonome peut se faire à deux niveaux :

- analyse de l'activité de conception;
- participation à la conception.

Le premier niveau considère l'ergonome comme un **observateur**, car il s'intéresse aux activités des concepteurs, d'un point de vue individuel, mais également collectif. Ces analyses touchent deux dimensions : cognitive et sociale. L'ergonome se propose ainsi d'identifier et de décrire les activités des concepteurs et les processus cognitifs [Sagot,1999].

Le deuxième niveau considère l'ergonome comme un **acteur** au sein du processus de conception de produits [Fadier,1998; Falzon,1998]. Le rôle de l'ergonome est, comme déjà évoqué, celui de **co-concepteur** [Sagot,1999]. Par rapport au premier niveau, où il reste à l'écart [De Montmollin,1998], **l'ergonome accompagne** ici le processus de conception**.** Sur la base des analyses ergonomiques qu'il réalise, il fournit des connaissances et des recommandations aux concepteurs. Il s'agit notamment d'éléments qui touchent au facteur humain et à ses interactions avec le futur produit. D'un commun accord avec les concepteurs, ils retiennent par la suite, à travers des réunions de travail, les données qui leur semblent pertinentes pour la conception du futur produit.

Nous avons montré ainsi l'existence de plusieurs démarches ergonomiques ou méthodologies de conception qui intègrent l'ergonomie. Malgré leur nombre important, il convient de rappeler qu'*il existe peu de modèles qui formalisent bien et précisément l'intervention ergonomique à chacune des phases de la conception*. C'est le cas du modèle de conception anthropocentrée de Sagot et al., qui montre **le rôle essentiel de l'ergonome**, à travers l'identification de ses actions dès le début et tout au long du processus [Sagot,1999; Sagot,2002; Sagot et al,2003].

I.4.3 Le modèle de conception anthropocentrée selon Sagot et al.

A l'appui de certains travaux de la littérature, le modèle de conception proposé initialement par Sagot et al. (figure I.6) a évolué progressivement vers un modèle de conception centrée sur l'Homme, évolution que nous décrirons par la suite (figure I.10).

En comparaison avec les autres modèles évoqués, il convient de mentionner que ce modèle de conception défend essentiellement le deuxième niveau de contribution ergonomique proposée par Fadier [Fadier,1998]. Celui-ci n'élimine pas le **rôle d'observateur de l'ergonome**, mais il insiste plus sur celui **d'acteur, de co-concepteur** dans le processus de conception de produits.

En effet, en accord avec les travaux de Duchamp [Duchamp,1999], l'ergonome participe "intensément" à la conception de produits, depuis la première phase d'analyse du besoin et jusqu'à la phase d'industrialisation même jusqu'à la phase suivante.

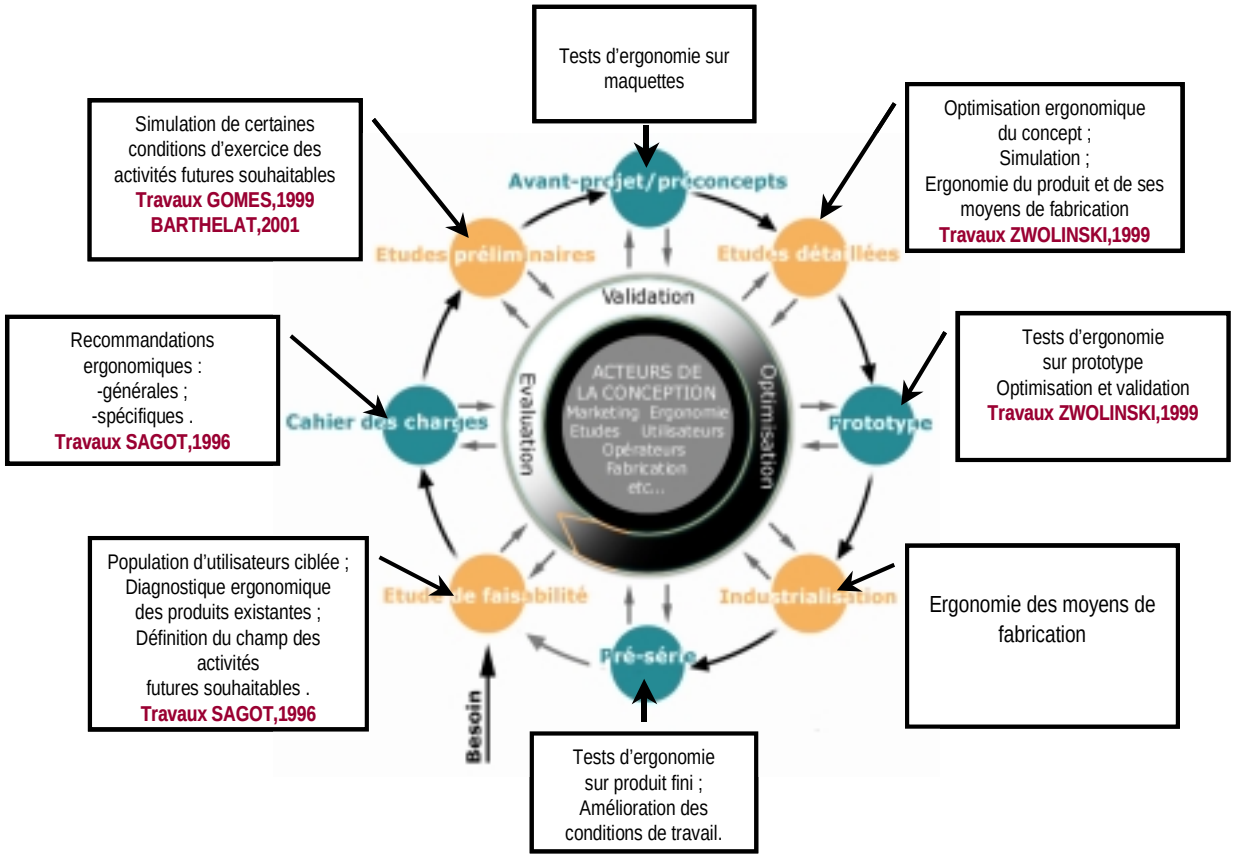


Figure I.10 L'intervention ergonomique dans la conception de produits [Source: Sagot ,2003]

C'est un modèle de conception ergonomique de produits car, de manière similaire à celui illustré par la figure I.11 et proposé par Laprie [Laprie,1996, cité par Marsot,2002], sa structure en spirale favorise la participation de l'ergonome à la validation de chacune des phases du processus.

Les applications du modèle proposé par Sagot et ses collègues à des cas concrets de conception de produits [Sagot,1999; Gomes,1999; Zwolinski,1999; Barthelat,2001] ont fourni des résultats encourageants, permettant l'ouverture vers de nouvelles pistes de recherche, dont la nôtre. C'est ce que nous souhaitons montrer par la suite à travers quelques exemples d'applications industrielles qui touchent notamment à la **conception de produits innovants** et intègrent les facteurs humains. Il s'agit pour ces produits, selon la classification faite par Duchamp, de distinguer deux concepts: **nouveau produit** et **produit nouveau** [Duchamp,1988].

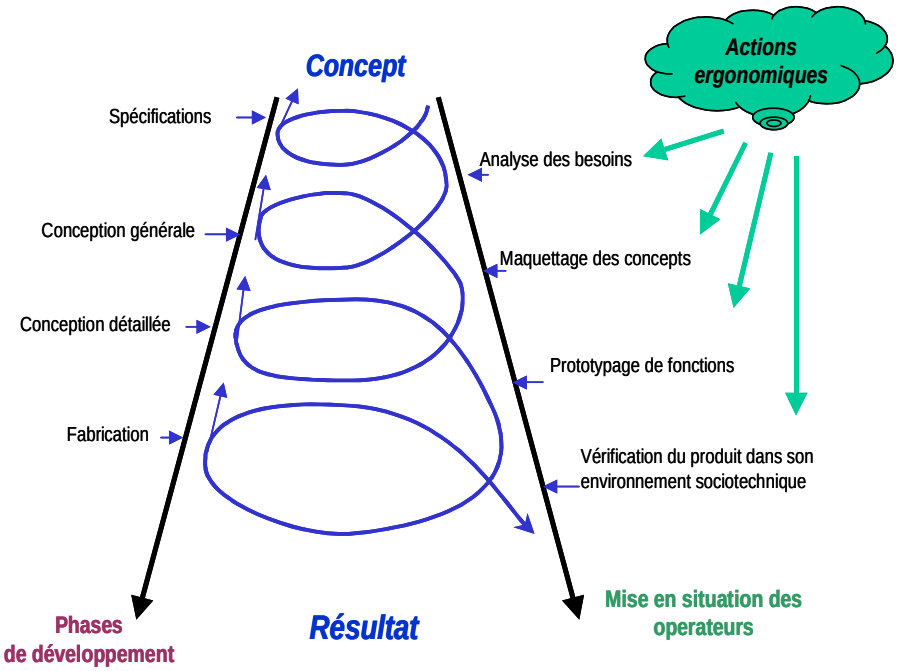


Figure I.11 Processus de développement ergonomique [d'après Laprie,1996]

Ainsi, ***le nouveau produit*** définit un produit qui apparaît après un autre et cela parce que l'entreprise veut proposer à ses clients une gamme complète de produits, les variations d'un produit à l'autre étant minimes.

Le produit nouveau est celui qui apparaît quand l'entreprise propose sur le marché un objet sortant du commun, un produit complètement nouveau, différent des produits traditionnels proposés dans les gammes existantes [Duchamp,1988].

Relativement à cette classification, le modèle a été appliqué principalement à **la conception de nouveaux produits.** Peu de ses applications ont concerné la conception de produits nouveaux. Il est d'ailleurs reconnu dans le monde industriel que, sauf innovation totale (de rupture), la majorité des cas de conception sont de type amélioratif [Fadier,1998]. Alors, presque toute conception de produits est une **re-conception** qui est confrontée à des produits existants, à des systèmes de référence,….Cela démontre encore plus la difficulté d'appliquer une démarche ergonomique à la conception au sens strict. En effet, tandis que *"la re-conception ergonomique d'un produit existant"* semble laborieuse pour des raisons liées à la multitude de situations existantes, *"la conception ergonomique d'un produit complètement nouveau"* apparaît encore plus difficile, parce qu'il faut prédire les futures caractéristiques du futur produit. Pour ce faire, il apparaît nécessaire pour les acteurs de la conception d'imaginer des activités d'utilisation réalisables par les futurs utilisateurs sur un produit qui n'existe pas encore. Il s'agit du *"paradoxe de l'ergonomie de conception"* très bien décrit par Thereau et Pinski, (1984), sur lequel nous reviendrons plus loin.

Ainsi, comme nous l'avons déjà évoqué, selon le modèle de Sagot et al., l'intervention de l'ergonomie se fait à plusieurs niveaux ainsi que l'illustre la figure I.10. C'est grâce aux nombreuses applications réalisées que des apports ergonomiques ont pu être formulés, vérifiés et ajoutés à chacune des phases du processus de conception [Sagot,1996a; Sagot et al.,1996b; Sagot et al.,1996c; Sagot et al.,1998; Gomes,1999; Zwolinski,1999; Sagot,1999]. En effet, il ne s'agit que d'applications partielles du modèle de conception proposé car, malheureusement, il n'y a pas eu jusqu'à présent d'étude de conception complète d'un produit et de ses moyens de production, permettant d'appliquer et valider tout l'enchaînement des phases du processus (figure I.10). Cependant, les travaux réalisés ont pu montrer des avantages, mais également des limites, que nous évoquons par la suite. Nous insistons surtout sur ces derniers, car certains d'entre eux sont à l'origine de notre sujet de doctorat.

I.4.4 Les limites de la conception anthropocentrée de produits

Prise en compte des critères ergonomiques pour la définition et évaluation des pré-concepts

Ainsi, selon les travaux de Sagot et col. [Sagot,1996a; Sagot et al.,1996b-c; Sagot et al.1998], l'apport ergonomique dans la première phase de conception (**études de faisabilité**) est issu des connaissances sur les utilisateurs ciblés : ***données biométriques*** *(l'état de la santé, les caractéristiques physiologiques, données anthropométriques)* et ***données socioculturelles*** *(niveau de qualification et de formation, niveau de vie, habitudes de vie, etc.)*, mais également des informations recueillies pendant l'analyse des produits existants. Sous la forme de recommandations définies par l'ergonome, ces données sont intégrées par la suite dans le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) du futur produit. L'ergonome participe ainsi depuis le début du processus de conception jusqu'à la définition du Cahier des Charges Fonctionnel, mais il est classique que son intervention s'arrête souvent là.

La deuxième phase de conception (**études préliminaires)** revient notamment aux **concepteurs** qui se réunissent pour proposer des pré-concepts pour le futur produit, en s'appuyant sur **le cahier des charges fonctionnel** et sur leurs savoir-faire. A travers des séances et outils de créativité (*brainstorming, TRIZ*) et aidés par les outils de représentation 2D et 3D (*AutoCad, Catia V5 R10, ProEngineer, SolidWorks,…*), ils aboutissent à plusieurs pré-concepts, modèles numériques du futur produit. Les concepteurs travaillent ensuite ces différentes maquettes numériques qu'ils évaluent selon les critères définis par eux-mêmes et en accord avec le CdCf, afin de pouvoir choisir celle qui sera la solution acceptable.

Concernant **l'ergonome**, celui-ci "participe" à la définition de ces pré-concepts, sur la base des recommandations qu'il a définies dans le CdCf. En effet, la matérialisation de ses recommandations

ergonomiques sous la forme de caractéristiques pour les pré-concepts est faite d'habitude par les concepteurs, à leur sens, sans avoir d'outils spécifiques pour cela. Et cette tâche est souvent très difficile et des fois impossible, fait constaté d'ailleurs sur les nombreux produits "non- ergonomiques" qui sont proposés sur le marché actuel par les entreprises.

Il s'agit donc ***d'une première lacune à ce niveau de la conception***, *la nécessité d'un outil d'aide à la traduction des recommandations et critères ergonomiques du cahier des charges fonctionnel*. **Comment faire alors pour pallier cette lacune?**

Selon nous, en accord avec les travaux de Gomes et Sagot, l'ergonome semble pouvoir contribuer ***à la définition et l'évaluation de plusieurs préconcepts***, *maquettes numériques du futur produit,* ***à travers des mannequins numériques*** [Gomes,1999; Sagot,1999]. Ainsi, dans le cadre de ses travaux de doctorat relevant du domaine de l'automobile, Gomes a montré les limites de la conception encore peu centrée sur l'Homme et ensuite la nécessité de proposer un outil capable de simuler et évaluer d'un point de vue ergonomique les activités gestuelles et posturales humaines et de guider à travers ces dernières les actions des concepteurs, dont la définition, l'évaluation et le choix des préconcepts [Gomes,1999].

Les mannequins numériques comme outils d'aide à une conception centrée sur l'Homme

Grâce au progrès informatique, il existe aujourd'hui de *nombreux outils de type mannequins numériques* capables de reproduire les dimensions anthropométriques de l'humain et, de plus en plus, leurs comportements physiques (gestes et postures) d'utilisation d'un produit [Kroemer,1973; Karwowski,1990; Porter 1993; Das,1995; Sengupta,1997; Verriest,2000; Chaffin,2001; Barthelat, 2001]. En plus de leurs capacités de simulation, certains d'eux offrent, à travers les méthodes d'évaluation ergonomique qu'ils intègrent, la possibilité d'évaluer également ces comportements humains reproduits. Il s'agit d'évaluations qui tiennent compte de **normes et critères ergonomiques** liés *à l'encombrement, à l'accessibilité, au volume d'atteinte, à la visibilité, aux contraintes biomécaniques (postures, efforts, répétitivité, durée d'activité,…) de l'humain*.

Il nous semble important de définir ici "le critère ergonomique". Nous reviendrons plus loin sur les autres notions qui lui sont liées. Ainsi, celui-ci est considéré comme *"une relation entre la description objective d'une situation constituant une contrainte pour l'Homme et l'expression de l'astreinte qui en résulte pour l'Homme"* [Verriest, 2000]. Nous faisons donc ressortir le but des évaluations ergonomiques à l'aide de ces modèles anthropométriques qui permettent d'identifier la pénibilité des comportements simulés de l'humain, donc des problèmes d'usage/d'exploitation posés par un produit à son utilisateur/opérateur. Par rapport à la conception de produits, ces mannequins numériques semblent prendre une place de

plus en plus importante. Ils tendent à intégrer progressivement le processus et les résultats se montrent satisfaisants. Malgré cela, leurs applications n'utilisent qu'une partie de leur vrai potentiel. En effet, la plupart de ces mannequins numériques sont utilisés aujourd'hui dans la conception de produit *uniquement pour évaluer les pré-concepts, maquettes numériques déjà proposées pour le futur produit*. Ils reproduisent ainsi les comportements physiques que le futur utilisateur/opérateur pourrait avoir lors de l'utilisation de ces "futurs produits", permettant par la suite leur évaluation ergonomique. Plusieurs boucles itératives *d'évaluation – optimisation - validation* des pré-concepts sont ensuite nécessaires et possibles en vue de retenir un pré-concept pour le futur produit. *Une intervention ergonomique de "correction"* est alors réalisable à ce niveau de la conception par l'intermédiaire de ces outils et des modules dont ils disposent. Cependant, il y a de la place pour mieux faire, c'est-à-dire pour faire intervenir le futur utilisateur/opérateur avant la définition des maquettes numériques du futur produit. Il s'agit *d'une intervention ergonomique de "conception",* point sur lequel nous reviendrons.

Prise en compte des critères ergonomiques pour la réalisation de maquettes physiques

Suivant le modèle proposé par Sagot (figure I.10) , nous arrivons à la phase d'études détaillées pour laquelle nous mentionnons les travaux de doctorat réalisés par Zwolinski qui traitent de la conception ergonomique d'un poste de conduite de TGV [Zwolinski,1999]. L'auteur a montré les apports de l'ergonome à la conception par l'intermédiaire de *la "simulation réaliste" de l'activité humaine*. Dans cette phase, de vrais utilisateurs, conducteurs de TGV, ont été appelés pour aider à choisir et optimiser les pré-concepts, maquettes physiques et interactives du futur poste de conduite TGV. Des boucles itératives de *conception – évaluation – validation* de ces pré-concepts réalisées avec ces utilisateurs ont permis ainsi le choix d'un concept final.

Malgré cela, toujours dans le cadre de l'intervention ergonomique, nous constatons, à travers les différents travaux antérieurs de conception de produits, que *le passage de la phase des maquettes numériques (études préliminaires) vers celle des maquettes physiques (études détaillées)* se fait assez brutalement, sans avoir une autre considération que celles des caractéristiques **anthropométriques** humaines. En effet, il y a rarement une intervention ergonomique à ce niveau de la conception. Et les effets en sont ressentis lors des tests réalisés avec les vrais utilisateurs, quand des modifications des maquettes physiques deviennent nécessaires, traduisant des coûts et délais supplémentaires de production. Il *s'agit alors à ce niveau d'une deuxième lacune dans le processus de conception ergonomique de produits*. Ainsi, une meilleure intégration des caractéristiques humaines du futur utilisateur devient nécessaire *après la définition des maquettes numériques et avant même la*

réalisation des maquettes physiques. **Quoi faire dans ce cas? Comment résoudre cela? Avec quel moyen, quel outil?**

Les outils de réalité virtuelle face à ces difficultés de la conception

Plusieurs *techniques et outils de réalité virtuelle* se développent grâce au progrès technologique et semblent offrir des fonctionnalités capables de résoudre ce "handicap" de la conception [Burdea,1993, Richir,1997; Fuchs,2001; Chedmail,2002; Fischer,2002 ; Fuch et Richir,2003]. Parmi ceux-ci, **les plates-formes de réalité virtuelle** semblent être les plus adaptées pour ce stade de la conception ergonomique de produits. Plus précisément, ces outils assistés par divers accessoires (gants, lunettes,..) peuvent permettre à des utilisateurs/opérateurs réels d'interagir avec le modèle numérique, solution du futur produit/poste de travail proposé à l'aide des mannequins numériques pendant la phase précédente de la conception. Les plates-formes de réalité virtuelle et les "interactions virtuelles" qu'elles offrent peuvent ainsi contribuer à la mise en évidence des évolutions futures pour le préconcept étudié, avant que ce dernier prenne la forme d'une maquette physique. Nous reviendrons sur ces aspects.

Revenant au modèle de Sagot et al, celui-ci montre une présence de l'ergonome même dans **la dernière phase du processus de conception,** par l'intermédiaire des *tests réalisables avec les vrais utilisateurs sur le produit fini*, mais sa contribution diminue en intensité [Sagot,1999].

Dans ce paragraphe, nous avons identifié les lacunes du modèle de conception anthropocentrée, liées notamment à une mauvaise collaboration de l'ergonome et du concepteur. Il apparaît ainsi nécessaire d'améliorer ce processus en vue de favoriser une meilleure articulation entre les tâches de ces deux acteurs. C'est ce que nous allons montrer par la suite.

I.5 Besoin d'une meilleure articulation "analyse ergonomique – conception de produits"

Les modèles présentés précédemment [Roussel,1996; Sagot,1999; Garrigou,2001; Leborgne,2001; Marsot,2002] mettent en évidence deux directions d'action opposées :

- la démarche ergonomique qui intègre des "activités de conception" ;
- la démarche de conception qui intègre des "actions ergonomiques".

Selon nous, en accord avec les travaux de Duchamp et Sagot [Duchamp,1988; Sagot, 2003], il est

nécessaire de définir un meilleur rapport entre les actions ergonomiques et les activités de conception, relation souhaitable dans les deux sens. Cela est d'ailleurs bien illustré par la figure I.12 qui présente ***l'articulation " analyse ergonomique – processus de conception"*** [Duchamp, 1988].

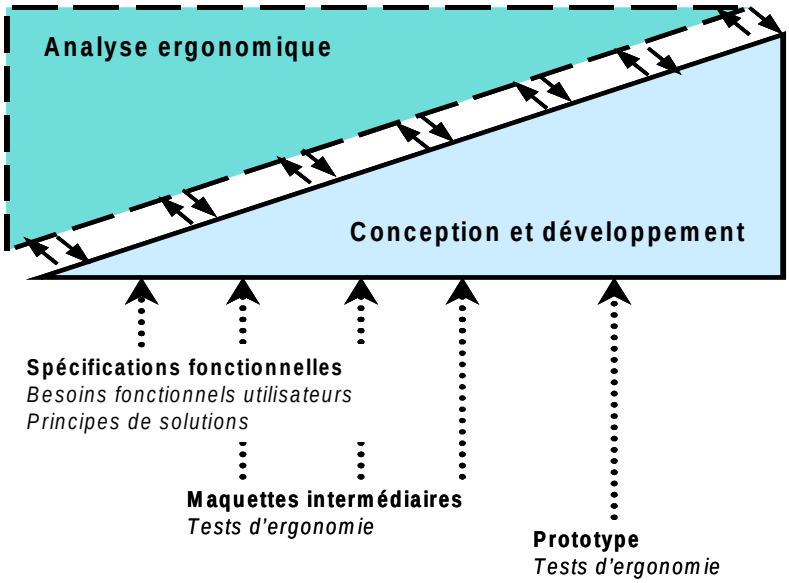


Figure I.12 Articulation de l'analyse ergonomique avec le processus de conception [Source: Duchamp,1988]

Comme déjà évoqué, le processus de conception d'un produit se réalise en plusieurs étapes. Il peut être considéré comme étant "*la transformation d'un concept en un produit*" [Marsot,2002]. En effet, à partir de son idée de création et jusqu'à sa réalisation, "un objet de conception" se présente sous différentes formes : *idée, croquis, schémas, dessins,* ***maquette numérique****, prototype, etc* [Duchamp,1999].

Il s'agit d'**objets hybrides** [Garro,1997] qui traversent une chaîne de transformations pour atteindre la forme finale de l'objet de conception, le produit final. Ils sont considérés comme étant des **"objets intermédiaires"** de la conception [Jeantet,1998a, Jeantet,1998b; Boujout,1998], à la fois d'un point de vue *"représentation"*, mais également d'un point de vue *"traduction et médiateur de l'action de conception"* [Boujout,2001].

Concernant la **représentation**, ces objets sont formalisés de manière différente et évolutive à chacune des phases de conception. Ainsi, au début du processus de conception, ils sont simples, facilement modulables, mais ils se complexifient de plus en plus vers la fin. Ils évoluent vers une forme finale qui réunit un maximum de contraintes et de recommandations issues de la participation des différents acteurs métiers [Troussier,1999]. Cela touche le deuxième aspect car ces objets ont un rôle de "**traducteurs**" des recommandations des acteurs de conception dans chacune des phases du processus. Ils sont en même temps des "**médiateurs"** [Jeantet,1998b], notamment dans les

interactions spécifiques du **réseau des acteurs de conception** [Garro,1997; Blanco,1998]**,** car ils mettent en relation *des logiques hétérogènes, des connaissances différentes, des outils différents*,…

L'articulation "ergonomie - conception", donc *la relation "ergonome – concepteur",* selon les aspects évoqués ci-dessus, est *conditionnée par l'évolution des objets intermédiaires de conception*. Il est évident ainsi qu'une intervention ergonomique est plus "riche" dans les phases amont de la conception, car les objets de conception sont plus faciles à modifier. La traduction des recommandations ergonomiques est favorisée dans ce cas par leurs représentations modulables. Nous évoquons ici les "**représentations numériques"** des objets de conception, les maquettes numériques de plus en plus utilisées dans le processus de conception.

En effet, de plus en plus d'outils informatiques intègrent le processus de conception de produits, favorisant son évolution vers le monde numérique (virtuel) [Das et al.,1995; Seitz et al.,2000]. Nous entendons même parler de **l'usine numérique**. Il s'agit d'une progression du numérique dans les entreprises, qui signifie une "dématérialisation" de leur production [Renaudeau,2002]. **La maquette numérique** est aujourd'hui, pour **de raisons de coûts et de délais**, de plus en plus intégrée dans la conception de produits.
Elle apparaît comme **un réel support de communication et de coopération** pour les acteurs du processus de conception, dont font partie l'ergonome et le concepteur.

La maquette numérique tente aujourd'hui de remplacer la maquette physique dont la réalisation est plus onéreuse (*coûts des matériaux, délais de réalisation, etc*.). Par rapport à la première qui est assez facilement modifiable, la transformation de la maquette physique selon les recommandations des ergonomes est souvent très difficile, voire impossible. La traduction des critères ergonomiques s'avère ainsi très difficile dans les phases finales de la conception, quand les objets de conception évoluent vers des maquettes physiques. *Il est alors déterminant pour les ergonomes d'intervenir plus tôt, dans les phases amont du processus, donc sur la maquette numérique du futur produit, en vue de mieux l'optimiser et de l'adapter au futur utilisateur/opérateur et afin de réduire le nombre de maquettes physiques* à réaliser.

L'ergonomie, facteur réel de sécurité et d'innovation, doit alors s'associer encore plus au processus de conception [Amalberti, 1997; Sagot, 2003]. Il faut donc trouver ou mettre en place des moyens et méthodes pour pouvoir réaliser une **meilleure articulation entre les compétences techniques des concepteurs, celles humaines de l'ergonome** (*connaissances sur le fonctionnement de l'homme, capacité d'analyse en lien étroit avec les opérateurs, capacité d'organisation et coopération*) et **celles des utilisateurs/opérateurs** [Daniellou,1995; Duchamp,1999].

C'est pour cela que les recherches actuelles dans le domaine se focalisent **vers une meilleure intervention de l'ergonomie, très tôt dans le processus de conception**. C'est d'ailleurs la direction dans laquelle nous concentrons nos travaux de recherche en essayant encore d'améliorer le modèle de conception proposée par Sagot et al. et cela par une **meilleure intégration des facteurs humains dans les phases amont,** lorsque le produit est encore à l'état numérique.

I.5.1 Positionnement de nos travaux de recherche

Notre recherche se positionne ainsi dans les deux premières phases du processus de conception : ***études de faisabilité*** et ***études préliminaires*** (figure I.13).

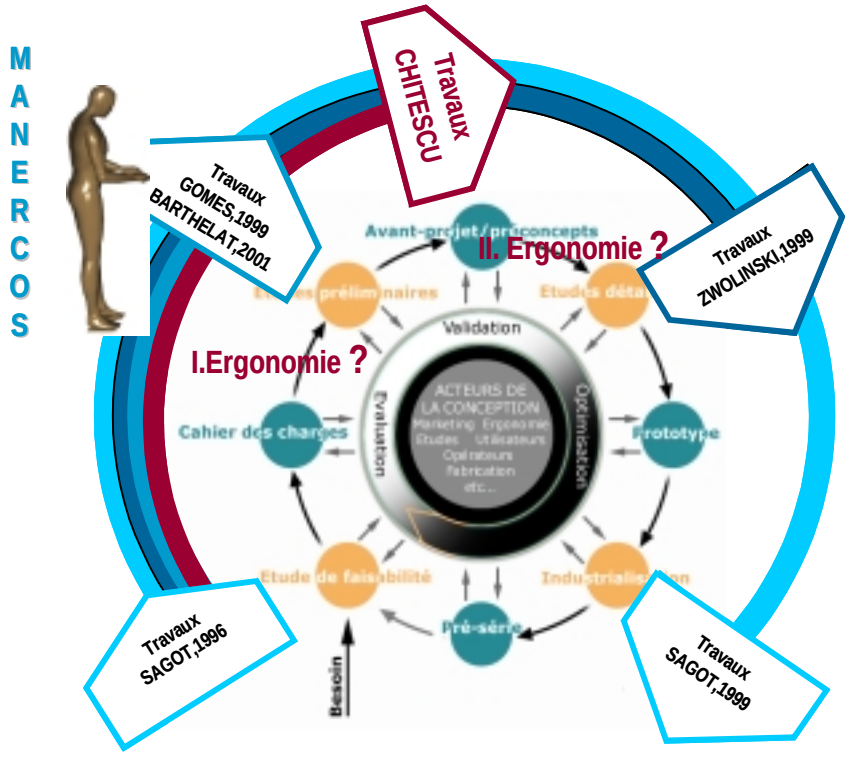


Figure I.13 Positionnement de notre recherche par rapport à la littérature

Dans la continuité des travaux antérieurs [Gomes,1999; Gomes,2000; Barthelat,2001], nous envisageons de montrer comment *la simulation numérique des activités gestuelles et posturales de l'humain à l'aide des mannequins numériques* peut contribuer à *une meilleure prise en compte des caractéristiques et capacités humaines*, *très tôt dans la conception de produits.* Il s'agit en particulier *d'aider les acteurs de la conception* ***à proposer des pré-concepts, maquettes numériques des futurs produits***, *et* ***de guider leur optimisation***, *ainsi que la* ***validation d'un concept acceptable*** *en terme de confort, santé et sécurité pour le futur utilisateur.*

En accord avec la préoccupation actuelle de la recherche qui est d'aider les entreprises à résoudre les problèmes de santé par une meilleure conception des systèmes de travail, notre recherche de doctorat vise en particulier **une amélioration de la conception des postes de travail et, par conséquent, des systèmes de travail associés, à travers l'ergonomie**. Nous précisons qu'il s'agit dans ce cas de considérer seulement certains des aspects traités par l'ergonomie, relevant uniquement de la **composante physique (dimension anglo-saxonne de l'ergonomie).**

Nos travaux s'intéressent plus particulièrement aux aspects anthropométriques et biomécaniques de l'ergonomie. Les aspects cognitifs et organisationnels ne seront pas abordés ici. Nous canalisons ainsi nos travaux vers l'analyse des **problèmes d'usage/d'exploitation** évoqués pour les postes de travail, mais uniquement par le prisme des **activités physiques de l'opérateur** *(ex: gestes et postures à la manipulation, porte de charge, transport,…)*. En effet, les conséquences de ces problèmes, dont les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS), devront nous aider à établir des diagnostics pour les postes de travail existants, diagnostics dont le processus de conception doit tenir compte. Il apparaît ainsi nécessaire sur ces postes de travail d'analyser les facteurs de risque d'apparition de TMS. Et parmi la multitude de facteurs qui sont à l'origine de ces maladies professionnelles (figure I.2), nous retiendrons pour analyse essentiellement **les facteurs biomécaniques** liés notamment *à la répétitivité des gestes, aux postures et aux efforts fournis au travail par les opérateurs*. Ainsi, dans cette phase d'analyse, nous considérons qu'il est important de faire intervenir un outil de type mannequin numérique *pour reproduire les activités gestuelles et posturales des opérateurs* et, à travers son module d'évaluation ergonomique, *pour aider les acteurs de la conception à évaluer les risques, les contraintes biomécaniques qui apparaissent sur ces postes de travail.* Ces évaluations doivent *les guider ensuite dans la définition des actions à suivre*: ***la re-conception*** *des postes de travail* ou ***la conception*** *de postes nouveaux de travail.*

Capables également ***de simuler des activités gestuelles et posturales futures souhaitables*** *en terme de confort, santé et sécurité pour les futurs opérateurs*, les mannequins numériques doivent intervenir par la suite dans *la phase de définition des pré-concepts, maquettes numériques des futurs postes de travail*. A travers *les évaluations ergonomiques qu'ils permettront ensuite pour ces activités simulées*, les mannequins numériques *vont aider les participants à la conception à choisir, parmi ces maquettes numériques, une solution acceptable pour le futur poste de travail*. C'est ainsi que nous considérons possible une meilleure prise en compte des capacités et caractéristiques biomécaniques des futurs opérateurs, très tôt dans le processus de conception innovante de futurs postes de travail, voire systèmes de travail.

I.5.2 Hypothèses de recherche

Sur la base des travaux cités, notre **objectif de recherche** consiste à favoriser *une meilleure intégration des caractéristiques et capacités physiques de l'Humain, relevant de l'ergonomie physique, dans la méthodologie de conception centrée sur l'Homme proposée par Sagot et al., et cela à travers la simulation numérique des activités gestuelles et posturales de l'Humain à l'aide des mannequins numériques.*

Dans la continuité des travaux de Gomes et Sagot [Gomes,1999; Sagot,1999], nous définissons notre hypothèse de recherche, ainsi :

Hp: La mise en place d'une "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée, qui intègre une méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain associée à des outils de type mannequins numériques, favorisera l'innovation par une meilleure considération des caractéristiques humaines, très tôt dans la conception de ces produits, encore au stade numérique.

Cette hypothèse "principale" se décompose en deux sous-hypothèses corrélées, ainsi :

Hp1 : La mise en place d'une "nouvelle" méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain favorise une meilleure articulation "Analyse ergonomique – Démarche de conception" :

- ***Doit permettre l'enrichissement de la méthodologie de conception anthropocentrée proposée par Sagot et al.,*** *en favorisant, en accord avec les principes de l'Ingénierie Concourante, la conception simultanée, donc* ***l'augmentation de la qualité d'usage des produits*** *et la réduction des coûts et des délais de conception :*

  - *Elle doit permettre une meilleure prise en compte du facteur humain, très tôt dans la conception des produits (diminuer, voire éliminer les problèmes d'usage);*

    - *en favorisant l'intégration des critères ergonomiques dans le CDCF à coté des critères techniques, économiques et sociaux ;*

- *en facilitant la traduction des critères ergonomiques du CDCF en fonctions d'usage pour le futur produit ;*

- Elle doit faciliter le passage d'un produit existant considéré "à risque" vers un produit futur "acceptable" (d'une ergonomie de correction " A POSTERIORI" vers une ergonomie de conception " A PRIORI") ;

- Elle doit permettre la prédiction des caractéristiques d'usage d'un futur produit, complètement nouveau (résoudre le paradoxe de l'ergonomie de conception).

Hp2 : Une meilleure exploitation des outils de type mannequins numériques favorise la fédération des acteurs de conception, notamment de l'ERGONOME et du CONCEPTEUR :

- Elle doit permettre aux mannequins numériques, dont MANERCOS, l'outil développé par le laboratoire SeT-ERCOS, d'évoluer et de mieux s'associer aux outils liés à la méthodologie de conception anthropocentrée proposée par Sagot et al.*, en vue de faciliter le dialogue, la réflexion et le travail collaboratif de l'ergonome et des concepteurs.*

- Elle doit permettre à l'ergonome de participer, à coté du concepteur, à la proposition, l'évaluation, l'optimisation et la validation des préconcepts, maquettes numériques des futurs produits, à travers la simulation et l'évaluation ergonomique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain :

- *en permettant une meilleure reproduction de l'Humain en proposant des modèles anthropométriques de plus en plus proche de la réalité ;*
- *en facilitant la reproduction des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain en proposant un module de simulation de plus en plus flexible, pouvant permettre de simuler des AGP Futures Souhaitables en terme de santé, sécurité et efficacité. Ces AGPFS peuvent représenter des supports à la collaboration des acteurs par une conception centrée sur l'Homme ;*
- *en facilitant les évaluations ergonomiques en proposant de nouvelles méthodes d'analyse, d'évaluation et d'interprétation des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain simulées.*

En vue de faciliter la compréhension par le lecteur, nous avons réalisé un schéma qui synthétise les liens existant entre les hypothèses définies auparavant, schéma qui est illustré par la figure I.14.

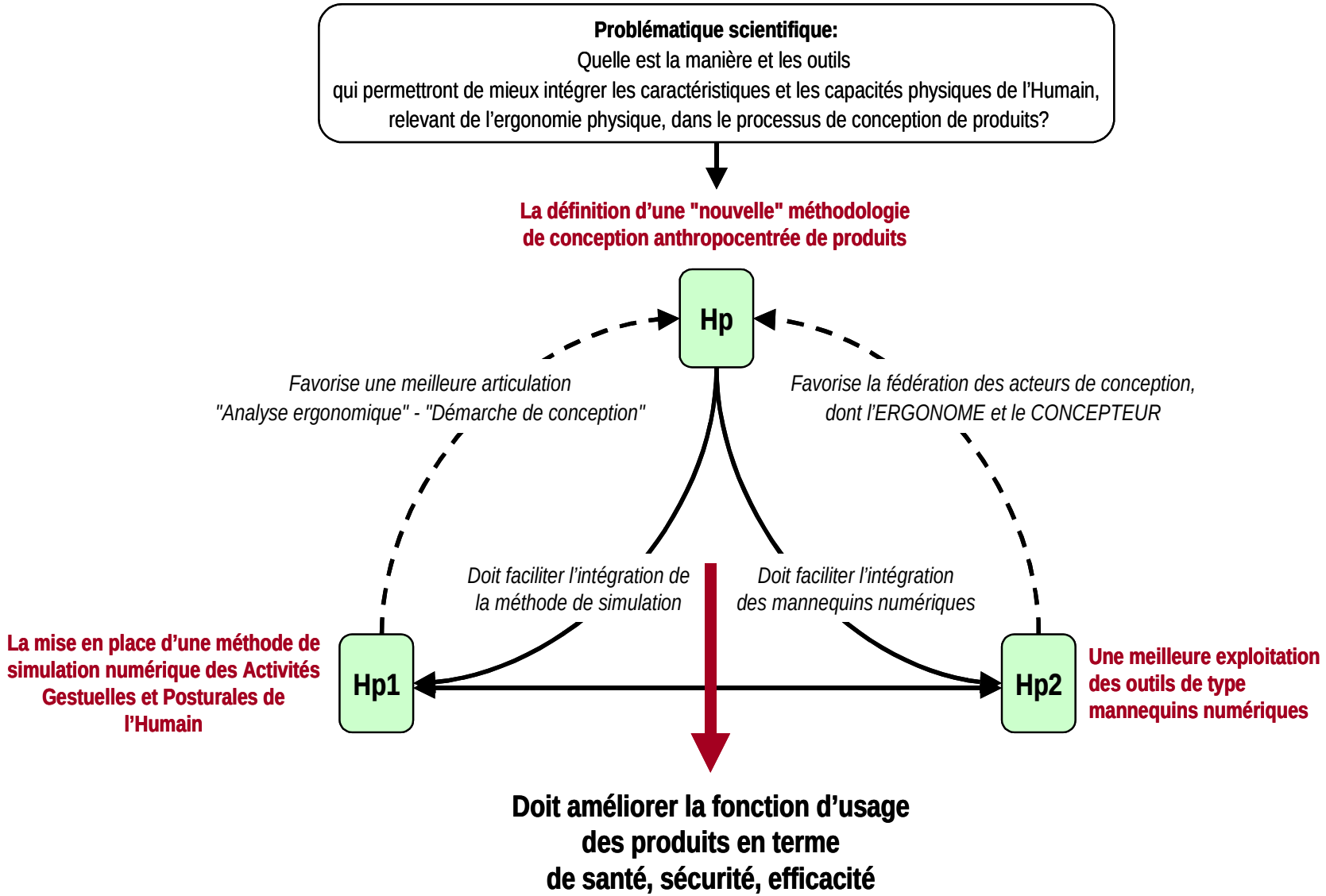

Problématique scientifique:
Quelle est la manière et les outils
qui permettront de mieux intégrer les caractéristiques et les capacités physiques de l'Humain,
relevant de l'ergonomie physique, dans le processus de conception de produits?
La définition d'une "nouvelle" méthodologie
de conception anthropocentrée de produits
Hp
Favorise une meilleure articulation
"Analyse ergonomique" - "Démarche de conception"
Favorise la fédération des acteurs de conception,
dont l'ERGONOME et le CONCEPTEUR
Doit faciliter l'intégration de
la méthode de simulation
Doit faciliter l'intégration
des mannequins numériques
La mise en place d'une méthode de
simulation numérique des Activités
Gestuelles et Posturales de
l'Humain
Hp1
Hp2
Une meilleure exploitation
des outils de type
mannequins numériques
Doit améliorer la fonction d'usage
des produits en terme
de santé, sécurité, efficacité

Figure I.14 Hypothèses de recherche

En effet, ces hypothèses représentent le support de nos travaux par la suite. Ainsi, l'étape suivante est destinée à la recherche méthodologique, nous permettant de proposer des modèles qui formalisent de manière détaillée nos suppositions. La partie de recherche expérimentale qui suit a pour but de tester et évaluer les modèles proposés afin de les valider. Ces applications mettent en évidence les avantages, mais également les limites de nos modèles, ces dernières pouvant ouvrir de nouvelles pistes de recherches.

Deuxième Partie

ASPECTS METHODOLOGIQUES

TABLE DE MATIERES

IIème Partie ASPECTS METHODOLOGIQUES MEILLEURE ARTICULATION "ERGONOMIE - CONCEPTION"..... 64

Introduction 64

II.1 Proposition d'une méthodologie de conception centrée sur l'Homme, intégrant la simulation numérique de l'activité physique humaine 65

II.1.1 Les caractéristiques du modèle de conception anthropocentrée 65

II.1.2 Les phases du modèle proposé de conception anthropocentrée 68

II.2 Les mannequins numériques – outils "intermédiaires" pour l'ergonome et le concepteur 71

II.2.1 Historique et l'évolution des mannequins numériques 71

II.2.2 Critères de classification des mannequins numériques 73

II.2.3 Les applications des mannequins numériques. Intérêt pour la conception de produits 74

II.2.4 MANERCOS - quel rapport avec les autres mannequins numériques? 76

II.2.4.1 Modélisation Anthropométrique 78

II.2.4.2 Modélisation numérique du système Homme – Produit - Environnement 80

II.2.4.3 Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain 81

II.2.4.4 Evaluation ergonomique du système Homme – Produit – Environnement à travers l'évaluation ergonomique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain 83

II.3 L'intégration de la méthode de simulation numérique des activités physiques humaines à l'aide du mannequin numérique MANERCOS dans la méthodologie de conception centrée sur l'Homme 87

IIème Partie ASPECTS METHODOLOGIQUES

MEILLEURE ARTICULATION "ERGONOMIE - CONCEPTION"

Citation

"La méthode, c'est le chemin, une fois qu'on l'a parcouru."

Marcel Granet

Introduction

Dans la première partie, nous avons montré les limites de la conception de produits et la nécessité de la rendre encore plus anthropocentrée. Nous avons évoqué également l'intérêt que les outils numériques et les techniques de réalité virtuelle semblent pouvoir avoir face à ce besoin. A partir de cela nous avons défini nos hypothèses de recherches. Par la suite, il s'imposait pour nous de construire des modèles permettant de valider nos hypothèses.

Ainsi, dans cette partie correspondant à notre propre contribution, nous allons exposer **un "nouveau" mode (méthodologie) de conception** qui traduit notre hypothèse principale (Hp). Nous travaillons plus précisément sur les deux premières étapes (Etudes *de faisabilité* et *Etudes préliminaires*) en proposant un modèle qui correspond à notre première sous-hypothèse (Hp1), donc à la mise en place d'une **méthode** de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain. L'intégration de cette méthode dans ce nouveau modèle de conception est possible grâce aux **outils** de type mannequins numériques, que nous étudierons par la suite en vue de proposer une meilleure exploitation de ceux-ci (Hp2). Plus précisément, notre objectif est d'identifier le modèle de mannequin numérique le plus adapté à notre démarche et de le faire évoluer pour mieux répondre à notre problématique de recherche.

En résumé, nous présentons **une "nouvelle" méthodologie de conception** et les méthodes et outils associés, dont **la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain,** ainsi que **l'outil MANERCOS** (Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes) retenu parmi les mannequins numériques.

II.1 Proposition d'une méthodologie de conception centrée sur l'Homme intégrant la simulation numérique de l'activité physique humaine

Proposition méthodologique : évolution proposée du modèle de Sagot

A partir du modèle de conception proposé par Sagot [Sagot,1999] (figure I.6) et à l'appui du modèle de l'ingénierie concourante [Bossard et al.,1997], qui se substitue au modèle linéaire et séquentiel de conception traditionnelle, nous proposons *une "nouvelle" méthodologie de conception centrée sur l'Homme* qui se développe sur plusieurs phases (figure II.1).

Selon les deux critères de caractérisation du processus de conception, déjà évoqués dans la première partie de ce document, notre modèle propose :

- un mode d'organisation des activités de conception qui favorise l'intégration de l'ergonomie pendant tout le processus de conception;
- un mode d'organisation des acteurs de la conception qui facilite leur travail en commun.

II.1.1 Les caractéristiques du modèle de conception anthropocentrée

S'inspirant du schéma proposé par Duchamp (1999), déjà évoqué (figure I.12), notre modèle montre, à travers deux espaces "complémentaires", une articulation des "actions ergonomiques" et "des activités de conception", depuis le début et tout au long du processus de conception.

Ainsi, l'espace inférieur présente *la structuration "dans le temps" des phases de la démarche classique de conception*, phases que nous avons déjà évoquées dans la première partie de ce document (études *de faisabilité, études préliminaires, études détaillées, réalisation,...*). A l'appui de ces dernières, dans l'espace supérieur de notre modèle, nous montrons *des actions ergonomiques qui peuvent être conduites dans chacune*. Cette représentation de notre méthodologie de **conception ergonomique** ou de **conception centrée sur l'Homme** permet de bien formaliser "*les points de rencontres"* ou *"les rendez-vous"* [Daniellou,1997] de l'ergonome et du concepteur.

Le schéma intégral met en évidence le fait que *l'ergonome s'associe au concepteur dès le début du processus de conception de produits* où sa contribution est très importante et décroît progressivement au fil du temps, la technique prenant le dessus sur l'ergonomie [Sagot et coll., 2003; Chitescu et coll.,2003].

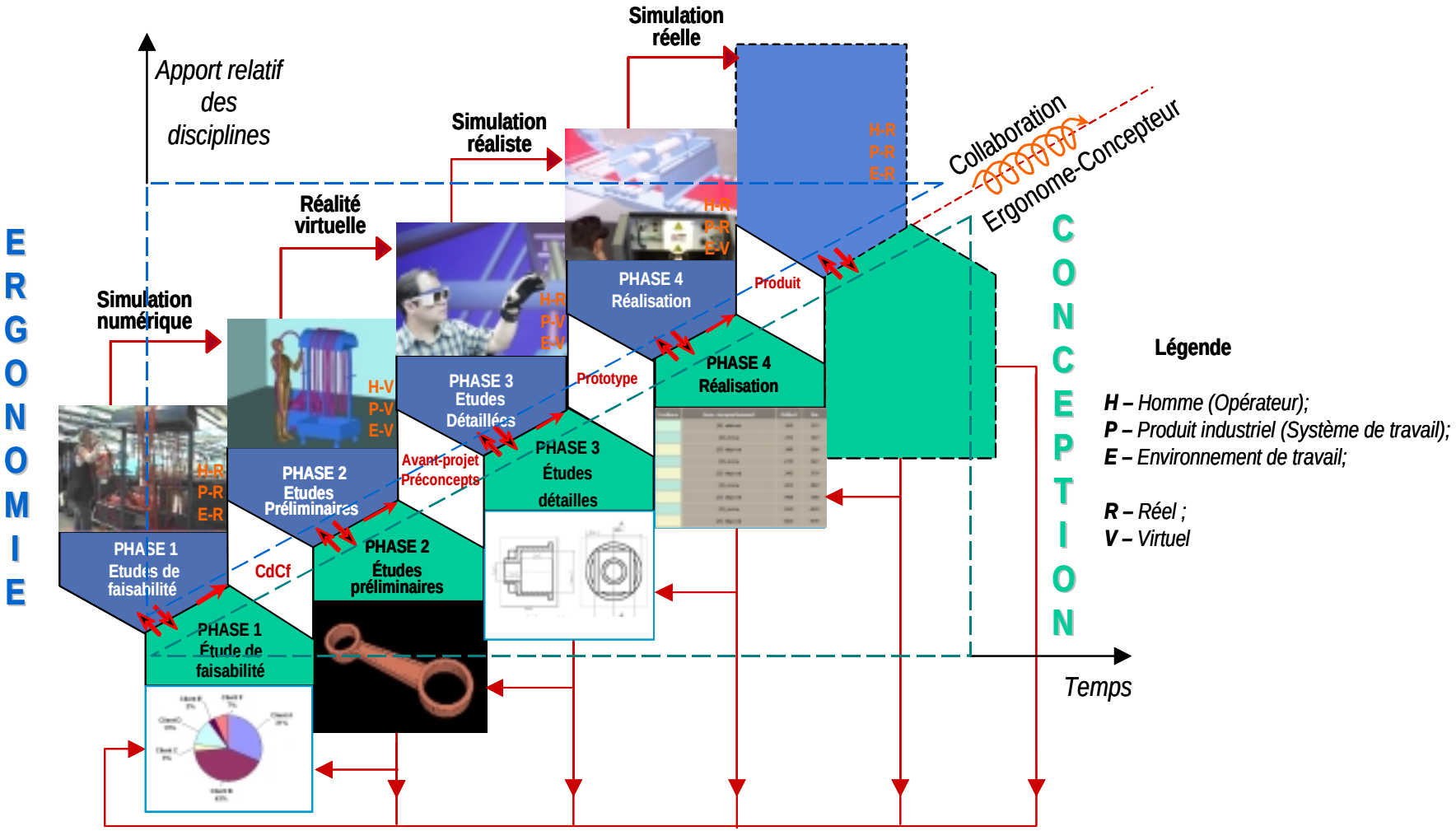


Figure II.1 Méthodologie de conception centrée sur l'Homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception" **[Chitescu et col.,2003a]**

De plus, il convient de rappeler qu'une **approche systémique** [Gomes,1999] est à la base de notre modèle de conception anthropocentrée qui réunit les acteurs, non seulement pour étudier "le produit à concevoir" pendant les différents stades de la conception, mais surtout le **système Homme – Produit - Environnement (H-P-E)** associé. Il s'agit alors de la prise en compte, pour ce produit, de son environnement d'utilisation et de l'utilisateur auquel il est destiné.

Ainsi, le système **H-P-E** supporte des transformations d'un **état réel** pendant **les études de faisabilité** *(**H**omme **R**éel - **P**roduit **R**éel - Environnement **R**éel)* à un **état virtuel** lors **des études préliminaires** *(**H**omme **V**irtuel - **P**roduit **V**irtuel - **E**nvironnement **V**irtuel)*, jusqu'à **l'état réaliste** *(**H**omme **R**eel - **P**roduit **R**eel - **E**nvironnement Virtuel)* et ensuite de nouveau l'**état réel** pendant les phases d'après réalisation (ex : industrialisation) (figure II.1). Nous précisons que ces transformations ne concernent pas uniquement les composants du système, dont l'Homme, le Produit et l'Environnement, mais surtout les interactions existant entre eux et qui leur permettent d'ailleurs d'évoluer. Ces interactions se matérialisent par ***des activités physiques de l'Homme,*** mises en évidence lors de l'utilisation/exploitation du Produit dans l'Environnement étudié. La transformation de ces interactions et donc *de ces Activités Gestuelles et Posturales Humaines (AGPH)*, fait appel à des approches telles que *la simulation numérique, la réalité virtuelle, la simulation réaliste, la simulation réelle*, approches qui correspondent à chacune des étapes principales de la conception sur lesquelles nous reviendrons. A cet égard nous mentionnons que la continuité entre les phases de conception est assurée par des **étapes "clés" intermédiaires :** *Cahier des charges fonctionnel, Avant-Projet, Prototype, Produit final.*

Un nombre important de moyens et d'outils sont associés aux étapes évoquées pour permettre une conception centrée sur l'Homme. Il s'agit des *outils spécifiques à chacun des acteurs participant au processus*, mais également "*des outils intermédiaires*" entre ceux-ci, sur lesquels nous reviendrons.

Nous précisons *que ce modèle de conception est valable pour la conception de tout produit*, que ce soit *de grande diffusion* ou *industriel*, les étapes de conception restant les mêmes dans les deux cas. Toutefois, certaines différences peuvent apparaître, par exemple au niveau des méthodes et outils employés pendant les phases de conception pour étudier des activités humaines différentes : *d'utilisation d'un produit de grande diffusion par un **utilisateur*** ou *d'exploitation d'un produit industriel par un **opérateur**.*

Compte tenu de l'intérêt que nous manifestons *pour une conception qui respecte la santé, la sécurité et le confort de l'opérateur au travail*, notre méthodologie porte, comme déjà évoqué, sur la conception de produits industriels, donc de postes/systèmes de travail. Nous la présentons de manière à ce qu'elle soit facilement applicable à ce type de produits, mais nous mentionnons que la même démarche est valable également pour la conception de produits de grand diffusion. Ainsi nous considérons, dans la

suite du texte, que **le système "Homme – Produit - Environnement"** représente pour nous le **système "Opérateur – Système de travail - Environnement de travail"** qui sera étudié pendant les étapes de conception. Nous les détaillerons par la suite.

II.1.2 Les phases du modèle proposé de conception anthropocentrée

Il convient dans cette partie d'évoquer les objectifs des **phases d'étude et de conception centrée sur l'Homme**, phases que nous considérons complémentaires [Chitescu et al.,2003a-b]. Ainsi :

La Phase 1 - Etude de faisabilité est la phase pendant laquelle "le besoin de conception" identifié par une entreprise est traduit en Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF). *La participation de l'ergonome* à cette phase ne se résume pas seulement à l'aspect normatif, avec *des informations issues de normes ergonomiques (**Ergonomie anglo-saxonne**)* ; *elle s'appuie également sur les situations existantes de travail (**Ergonomie francophone**)*. En effet, l'intervention ergonomique nécessite **une étape d'observation et d'analyse des systèmes de travail réels,** qui correspond, selon l'approche systémique évoquée, à l'étude des *systèmes H-P-E, **complètement réels** (**HR-PR-ER**).* Pour ce faire, l'ergonome dispose d'une palette d'outils et de méthodes ergonomiques spécifiques lui permettant de travailler de façon individuelle, là généralement sans autre assistance, et d'aboutir à des recommandations qui sont intégrées par la suite dans le CdCF.
En vue de *faire participer également les concepteurs* à la définition de ces recommandations ergonomiques pour un futur système de travail, nous proposons d'employer les outils de type mannequins numériques, qui permettront, grâce à leurs capacités, de modéliser, simuler et évaluer les Activités Gestuelles et Posturales Réelles (AGPR) des opérateurs appartenant aux systèmes H-P-E étudiés. A la fois *outils du concepteur* car il relèvent de la CAO, mais également *de l'ergonome* car ils disposent des normes et méthodes ergonomiques, les mannequins numériques facilitent la coopération de ces deux acteurs à travers "la traduction des besoins des opérateurs" sous forme de recommandations pour le CdCF.

La Phase 2 - Etudes préliminaires est consacrée à la recherche d'idées et à la proposition des préconcepts pour le futur système de travail, par les acteurs de la conception. Ainsi, l'ergonome intervient ici par l'intermédiaire des mannequins numériques qui sont capables de traduire les recommandations ergonomiques issues du CdCf à travers *la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS)* de travail, en termes *de confort, santé et sécurité pour le futur opérateur*. Ces activités simulées aident les acteurs participants, dont les concepteurs, ergonomes, etc., *à la recherche d'idées* favorisant ainsi ***la définition de plusieurs***

préconcepts, maquettes numériques du futur système de travail. La simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF) de travail des futurs opérateurs sur ces préconcepts permet, par la suite, leur *évaluation*, mais également leur évolution vers une solution "de plus en plus optimale". *Plusieurs boucles de* ***"Conception - Evaluation - Validation"*** sont ainsi possibles pour ces préconcepts, grâce aux activités de travail simulées avec les modèles numériques de l'Humain. Nous mentionnons que le *système Homme – Produit - Environnement* étudié dans ce cas est *entièrement virtuel* (**HV-PV-EV**).

Les mannequins numériques, par les activités humaines qu'ils sont capables de reproduire, interviennent alors en deux étapes :

- *par la définition et ensuite l'interprétation des critères ergonomiques du CdCf et la proposition des préconcepts*, maquettes numériques de futurs systèmes de travail, ***répondant ainsi au premier manque du modèle de conception proposée par Sagot et al****.;*

- *par l'évaluation et l'optimisation des préconcepts proposés* auparavant et *au niveau du choix d'un concept acceptable* pour le futur système de travail.

La Phase 3 - Etudes détaillées consiste dans l'évaluation du concept retenu préalablement, solution proposée pour le futur système de travail, et cela *grâce à une plate-forme de réalité virtuelle et à l'aide d'un opérateur réel immergé dans un environnement complètement virtuel.* Le système étudié dans cette phase est de type ***H****omme* ***R****éel - **P**roduit **V**irtuel - **E**nvironnement **V**irtuel* (**HR - PV-EV**).

Cette étape vient s'ajouter au modèle initial de Sagot et al. ***pour répondre au deuxième manque,*** évoqué dans la première partie du document, qui concerne le passage entre le stade de "*maquette numérique"* et celui de *"maquette physique"* du système de travail.

En effet, *la plate-forme de réalité virtuelle devra permettre à de futurs opérateurs réels d'interagir avec le modèle numérique*, solution du futur système de travail proposé à l'aide des mannequins numériques pendant la phase précédente, et de mettre en évidence des évolutions futures pour ce préconcept. Ainsi, l'ergonome intervient ici pour étudier et évaluer, selon des critères ergonomiques, les Activités Gestuelles et Posturales des "vrais opérateurs" lors de l'exploitation du futur système de travail, modèle numérique proposé auparavant.

Le concepteur se joint à l'ergonome pour *approfondir les résultats des évaluations ergonomiques* et *pour identifier*, ensemble, *les modifications nécessaires à apporter au futur système de travail*, modifications encore faciles à ce stade numérique de la conception.

Selon le cas, des boucles de "test - évaluation – optimisation" sont réalisables par les acteurs de la conception, dont font partie les opérateurs qui participent directement à la conception de leur futur système de travail.

C'est ainsi qu'**une meilleure prise en compte de caractéristiques et capacités de l'humain est possible dans la conception de systèmes de travail**, avant même de construire leurs maquettes physiques, leurs prototypes,….

Ces aspects n'ont pas fait l'objet d'expérimentations et sont présentés ici comme des perspectives de recherche. Nous l'avons seulement évoqué ici dans le souhait de montrer des évolutions encore possibles pour le processus de conception anthropocentrée vers "une conception ergonomique totale".

La Phase 4 - Réalisation envisage l'évaluation et la validation ergonomique du prototype, concept du futur système de travail retenu pendant la phase précédente, et cela à travers la "simulation réaliste" de l'activité de travail de "vrais" opérateurs. L'ergonome intervient ici pour analyser les Activités Gestuelles et Posturales "Réalistes" des opérateurs. Nous précisons que le *système étudié pendant cette phase est de type* ***H****omme* ***R****éel -* ***P****roduit* ***R****éel -* ***E****nvironnement* ***V****irtuel (****HR – PR - EV****);*

Il est évident que le processus de conception ne s'arrête pas à ce stade. Le concept retenu pour le nouveau système de travail est *testé et évalué en situation réelle de travail, lors de l'étude d'un système* ***H****omme* ***R****éel -* ***P****roduit* ***R****éel -* ***E****nvironnement Réel –* ***HR-PR-ER****,* ensuite il passe dans les autres phases de son cycle de vie.

Nous avons présenté les différentes étapes de la méthodologie proposée qui mettent en évidence une évolution ***vers une conception ergonomique totale***.

Par la suite, nous insisterons seulement sur les phases de début du processus de conception, celles ***des études de faisabilité*** et ***des études préliminaires***. Notre choix est justifié par *l'apport de l'ergonomie qui apparaît déterminant dans les phases initiales de conception*, phases où *la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) intervient par l'intermédiaire des mannequins numériques pour aider à une meilleure prise en compte des facteurs humains*. A travers la description de ces deux étapes, *nous souhaitons montrer la manière dont ces mannequins numériques intègrent la méthodologie de conception* participant ***à la définition, proposition, conception et validation*** *des futurs systèmes de travail* à partir de *l'observation et l'analyse ergonomique des situations de travail existantes*. Mais avant tout, il convient de faire un rappel sur ces mannequins numériques en vue de mettre en évidence, à travers leurs avantages et leurs limites, l'outil qui s'adapte au mieux à ce nouveau mode de conception.

II.2 Les mannequins numériques – outils d'aide à une conception centrée sur l'Homme

II.2.1 Historique et l'évolution des mannequins numériques

Le développement des mannequins numériques a débuté pendant les années soixante chez Boeing Corporation. Ainsi, **BOEMAN,** le premier programme opérationnel de modélisation du corps humain**,** a été conçu pour aider à l'évaluation ergonomique de *cockpits d'avion* [Verriest,2000]. Mais, pour des raisons liées à l'avancement de la technique de cette époque, l'exploitation de ce système a été difficile [Porter,1993; Verriest,2000]. Cependant, la période suivante (1960-1970) a encouragé l'apparition de nouveaux modèles numériques de l'humain, de plus en plus performants [NRC,1988; Kroemer,1973; Porter,1993; Das,1995; Verriest,2000]. A titre d'exemple, nous citons **CYBERMAN**, modèle 3D de l'humain**,** développé pendant les années 70 par Chrysler Corporation, commercialisé plus tard par Control Data Corporation et qui a été utilisé pour *la conception de cockpits d'automobile*.
Les recherches à ce sujet ont été amplifiées depuis, favorisant aujourd'hui le développement d'un nombre important de tels outils capables de reproduire l'être humain avec un degré de fidélité de plus en plus grand. Parmi ceux-ci, les plus performants sont : **ENVISION/ERGO, JACK, MAN3D, RAMSIS, SAFEWORK PRO, SAMMIE, VIRTUAL ANTHROPOS, …** (Cf. Annexe A2).

Ainsi, **ENVISION/ERGO** [Delmia,2000a] est un outil destiné à la *conception et l'optimisation des postes de travail manuels dans les ateliers de montage, de soudure*…. Il dispose de fonctions qui sont communes aux autres outils de modélisation humaine, mais il possède la meilleure interface de simulation des mouvements et gestes humains [Donald,1998; Jaudoin,2000] (figure II.2).

JACK [Wolfer,2000; EDS,2002] est un autre logiciel de modélisation et de simulation du comportement physique de l'humain qui trouve son application *dans la conception, la fabrication et la maintenance de produits appartenant notamment au domaine de l'automobile, de l'aéronautique, de la défense, etc., ainsi qu'à la formation des opérateurs* (figure II.3) [Coze,2000, Cristmansson,2003]. Il favorise la création d'environnements virtuels, l'intégration de mannequins virtuels de différentes dimensions ainsi que la modélisation et la simulation de l'activité humaine et l'analyse de ses performances. C'est un véritable "outil ergonomique" car il intègre une dizaine de méthodes d'évaluation ergonomique (NIOSH, RULA, OWAS, MTM…), méthodes qui seront expliquées plus loin.

Figure II.2 ENVISION / ERGO [Chrismansson,2003]

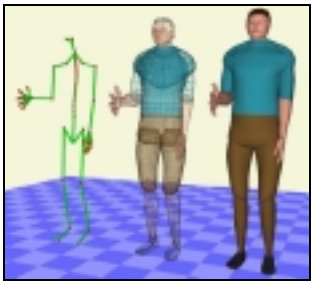


Figure II.3 JACK [EDS,2002]

RAMSIS [Marach,2000; Seitz,2000; Christmansson,2003] est également un outil de conception ergonomique car il est utilisé notamment dans les évaluations ergonomiques des modèles numériques des produits appartenant à *l'industrie de l'automobile (conception et évaluation de cockpits)* (fig.II.4).

SAFEWORK PRO, peut-être "le plus sophistiqué" modèle 3D de l'humain [Goussu, 2000], est capable de reproduire une grande variété de modèles anthropométriques humains, utiles ensuite pour la *conception de produits appartenant aux différents domaines (automobile, aviation, médical, militaire, etc.), pour l'évaluation de la sécurité, du fonctionnement et de la maintenance d'une ligne de production, etc.* (figure II.5).

Figure II.4 RAMSIS [Christmansson,2003]

Figure II.5 SAFEWORK PRO [Delmia,2000b]

SAMMIE – System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation (figure II.6), model virtuel de l'humain, a été créé par Nottingham University, UK, et repris ensuite par Loughborough University, UK [Case,1990; Porter,1993; Das,1995; Case,2001; Verriest,2001]. Commercialisé actuellement par la société SAMMIE CAD, il trouve son application *dans la conception et l'organisation du matériel et des meubles dans des zones publiques, des bureaux et des maisons, la conception des habitacles de divers véhicules, la conception des panneaux de commande, etc.*

VIRTUAL ANTHROPOS [Riedel,1997; Wolfer,2000] est un logiciel de modélisation de l'humain, utilisé à la fois par les concepteurs, les architectes, les designers, les ergonomes, les managers, pour planifier la

production, mais également par les réalisateurs des films vidéo, car les rendus graphiques des modélisations numériques sont de niveaux assez élevés (figure II.7).

Figure II.6 SAMMIE [Case,2001]

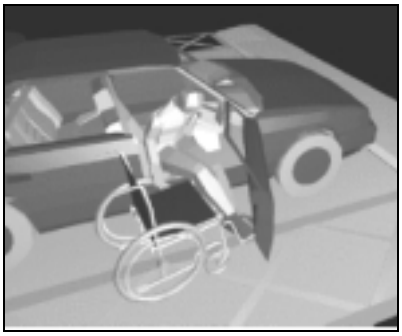


Figure II.7 VIRTUAL ANTHROPOS [Riedel,1997]

Il existe beaucoup d'autres mannequins numériques, mais leur comparaison et leur classification restent difficiles pour plusieurs raisons : *les différents niveaux de développement des outils, les différentes caractéristiques des systèmes, le statut différent (commercial, de recherche,…), la variété d'applications, etc.* [Verriest, 2000] (cf. Annexe A2). Toutefois, de nombreux auteurs ont essayé de trouver les caractéristiques communes de ces outils [NRC,1988; Karwowski,1990; Porter,1993; Das et Sengupta,1995;Nedel,1998; Landau,2000; Verriest,2000; Barthelat,2001; Chaffin,2001; Porter,2001], caractéristiques que nous présentons par la suite.

II.2.2 Critères de classification des mannequins numériques

La représentation de l'être humain avec ses comportements est un processus difficile, en raison de la complexité du corps humain. Pour mieux s'approcher de la réalité humaine, il est nécessaire de prendre en compte de nombreux paramètres. C'est pour cela que le développement d'un modèle virtuel humain nécessite de commencer par la définition très précise de son objectif, de sa destination,… Les nombreuses caractéristiques de l'être humain conduisent alors vers la réalisation de **mannequins numériques "différents"**, présentant des *niveaux variés de fidélité par rapport à l'humain réel, niveaux imposés par le type d'application souhaitée* [Ruisseau,2000]. Par exemple, **la fidélité géométrique de l'humain** (*formes, dimensions, articulations, segments corporels, etc.*) est essentielle pour *la conception et l'évaluation ergonomique des différents produits/systèmes*, tandis que la **fidélité temporelle** est importante dans des *applications telles que les jeux, les simulations militaires, training etc.*

Ainsi, d'après la classification faite par Porter [Porter,1993], les mannequins numériques se distinguent selon ***la complexité du modèle de l'humain*** *(nombres d'articulations, angles de confort, type de*

postures), ***les bases de données anthropométriques*** *(contrôle de la mesure du corps ou des segments corporels individuels),* ***facilité de modélisation 3D de l'environnement, l'apparence du modèle humain*** *(la présentation du modèle, nombre de vues),* ***les modules d'évaluation*** *(du volume d'atteinte, du champ visuel, des postures)… Nous reviendrons plus loin sur ces notions.*

En 1995 une autre classification a été réalisée par Das et ses collègues [Das et coll,1995] pour les mannequins numériques, et d'autres critères de comparaison ont été proposés : ***le logiciel 3D - support et les possibilités de modélisation 3D***, ***les coûts et les conditions de commercialisation***, ***la possibilité de construire un modèle 3D à partir des mesures du corps humain***, ***la structure cinématique du modèle humain et la facilité de manipulation***, *etc.*

D'autres critères de distinction des mannequins numériques sont, par exemple, **le taux d'utilisation** (fréquente, occasionnelle ou spécifique), **les capacités du mannequin** (anthropométrie, biomécanique et cinématique, animation, détection de collision, habillement, vision réaliste, enchaînement de tâches,…), **la configuration d'emploi** (autonome ou dépendante d'un système de conception assistée par ordinateur – CAO) ou **la spécificité d'application** (conception, ergonomie, évaluations, essais, …) etc. [Ruisseau,2000].

II.2.3 Les applications des mannequins numériques. Intérêt pour la conception de produits

La multitude des outils et les particularités de chacun permettent, comme déjà évoqué, leur application dans des domaines et conditions très variés. Ainsi, les principaux domaines d'application de ces modèles virtuels de l'être humain sont [Karvowski,1990; Badler,1997; Landau,2000; Chaffin,2001] : **l'ingénierie** *(conception, modélisation, simulation, analyse et évaluation des prototypes virtuels)*, l'**ergonomie** *(analyse et évaluation de maquettes virtuelles des différentes produits ou moyens de production, évaluation des interactions avec les utilisateurs),* **design** *(évaluation des dimensions, formes, styles, aspects, etc. des différentes maquettes de produits et de leur impact sur utilisateur)*, **entretien – maintenance** *(étude d'accessibilité et de visibilité, facilite de réparation, maintenance, sécurité, etc.),* mais également **la réalisation des environnements virtuels**, **la communication et coopération virtuelle (Vidéo -Conférences)**, **la formation**, etc.
Pour ce qui nous concerne , les domaines d'application à **l'ingénierie** et **à l'ergonomie**, nous intéressent tout particulièrement.

En effet la "technique du numérique" semble favoriser aujourd'hui la validation d'une solution d'un produit "en évitant" l'utilisation de la maquette physique [Chedmail,2002]. Ainsi, les mannequins numériques sont utilisés aujourd'hui dans la conception de produits, notamment pour **l'évaluation ergonomique des maquettes numériques** [Ruiter,2000], pré-concepts déjà proposés pour les futurs produits (figure II.8). Pour cela, des modèles anthropométriques correspondant aux futurs utilisateurs/opérateurs sont générés dans les environnements virtuels associés aux produits numériques, permettant ainsi la modélisation de plusieurs systèmes Homme - Produit – Environnement.

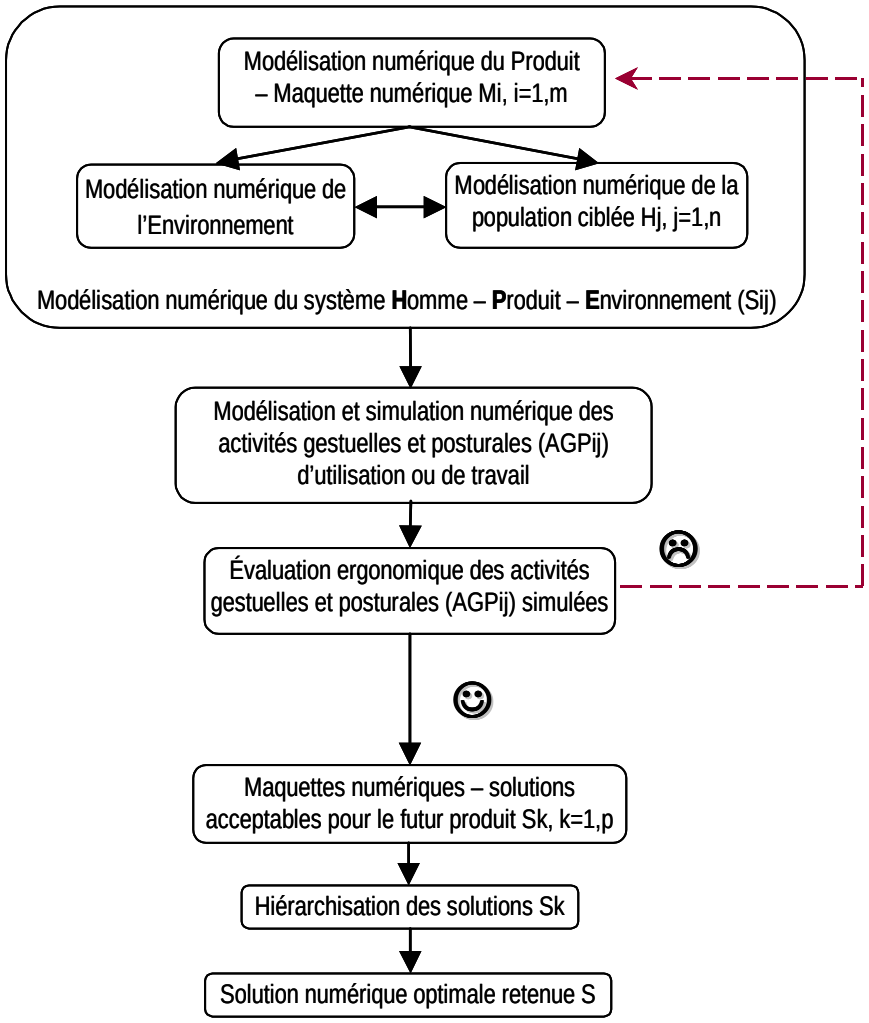

Modélisation numérique du Produit – Maquette numérique Mi, i=1,m
Modélisation numérique de l'Environnement
Modélisation numérique de la population ciblée Hj, j=1,n
Modélisation numérique du système Homme – Produit – Environnement (Sij)
Modélisation et simulation numérique des activités gestuelles et posturales (AGPij) d'utilisation ou de travail
Évaluation ergonomique des activités gestuelles et posturales (AGPij) simulées
Maquettes numériques – solutions acceptables pour le futur produit Sk, k=1,p
Hiérarchisation des solutions Sk
Solution numérique optimale retenue S

Figure II.8 Démarche générale d'utilisation des mannequins numériques dans la conception de produits

Ces mannequins numériques sont amenés par la suite à interagir avec ces maquettes numériques et les environnements associés, favorisant ainsi la modélisation et la simulation des Activités Gestuelles et Posturales que les futurs utilisateurs/opérateurs seront amenés à réaliser lors de l'utilisation/exploitation de celles-ci. Différentes évaluations ergonomiques sont possibles ensuite pour ces activités simulées, conduisant, selon le cas, soit à la validation des maquettes numériques, soit à la modification ultérieure de celles-ci. Les maquettes numériques validées sont ensuite hiérarchisées, selon des critères établis

par les acteurs de conception, permettant ainsi le choix d'une solution numérique acceptable pour le futur produit. On passe ensuite aux autres phases du processus de conception.

La modélisation numérique du futur produit (maquette numérique) et de son environnement d'utilisation, la représentation virtuelle du futur utilisateur à l'aide des mannequins numériques, ainsi que la modélisation et la simulation des activités d'utilisation du futur produit par le futur utilisateur, permettent une intervention ergonomique très tôt, dès la deuxième phase de conception de ce produit.
L'intégration des mannequins numériques dans le processus de conception de produits devient alors précieuse, voire indispensable, car elle **favorise l'intégration du facteur humain dans la conception** en cours. Ils constituent d'ailleurs des **facteurs de progrès et d'innovation**.

Il convient de préciser que, parmi ces modèles numériques de l'humain, nous avons retenu pour nos travaux **le mannequin numérique MANERCOS** (**M**odule d'**AN**alyse pour l'**ER**gonomie et la **CO**nception des **S**ystèmes) qui est le résultat des travaux de doctorat conduits par Gomes [Gomes,1999] au sein du laboratoire SeT-ERCOS.
En effet, à travers la présentation de l'outil MANERCOS en rapport avec les autres mannequins numériques existants, nous développons certaines caractéristiques déjà évoquées pour ceux-ci, qui concernent surtout *la structure cinématique des modèles humains, les bases de données anthropométriques, la facilité de modélisation numérique du système "Homme – Produit – Environnement", la facilité de simulation des comportements et gestes humains, les possibilités d'évaluation ergonomique, etc.* Le but est alors de mettre en évidence ***le rôle actuel des mannequins numériques dans la conception ergonomique de produits***, mais surtout de souligner, par l'intermédiaire de l'outil MANERCOS, *leur "vrai potentiel" et, en conséquence, de "nouvelles possibilités d'intervention" dans le processus.*

II.2.4 MANERCOS - quel rapport avec les autres mannequins numériques?

Le mannequin numérique MANERCOS représente une application métier intégrée dans *un logiciel générateur d'images de synthèse* (3D Studio MAX) qui dispose d'interfaces avec des *logiciels de CAO* (CATIA, PRO Engineer, AutoCAD, Solidworks, etc). C'est un outil qui gère des mannequins anthropométriques sous forme de modèles géométriques animés : *structure hiérarchique articulée et paramétrable d'un point de vue cinématique à partir de données biomécaniques* [Gomes et coll.,2000].
En effet, la reproduction des dimensions de l'humain, la modélisation et la simulation de ses Activités Gestuelles et Posturales et l'évaluation ergonomique de ces dernières sont possibles grâce aux trois

modules de l'outil MANERCOS (figure II.9), couplés aux fonctionnalités du logiciel 3D Studio Max [Gomes,1999].

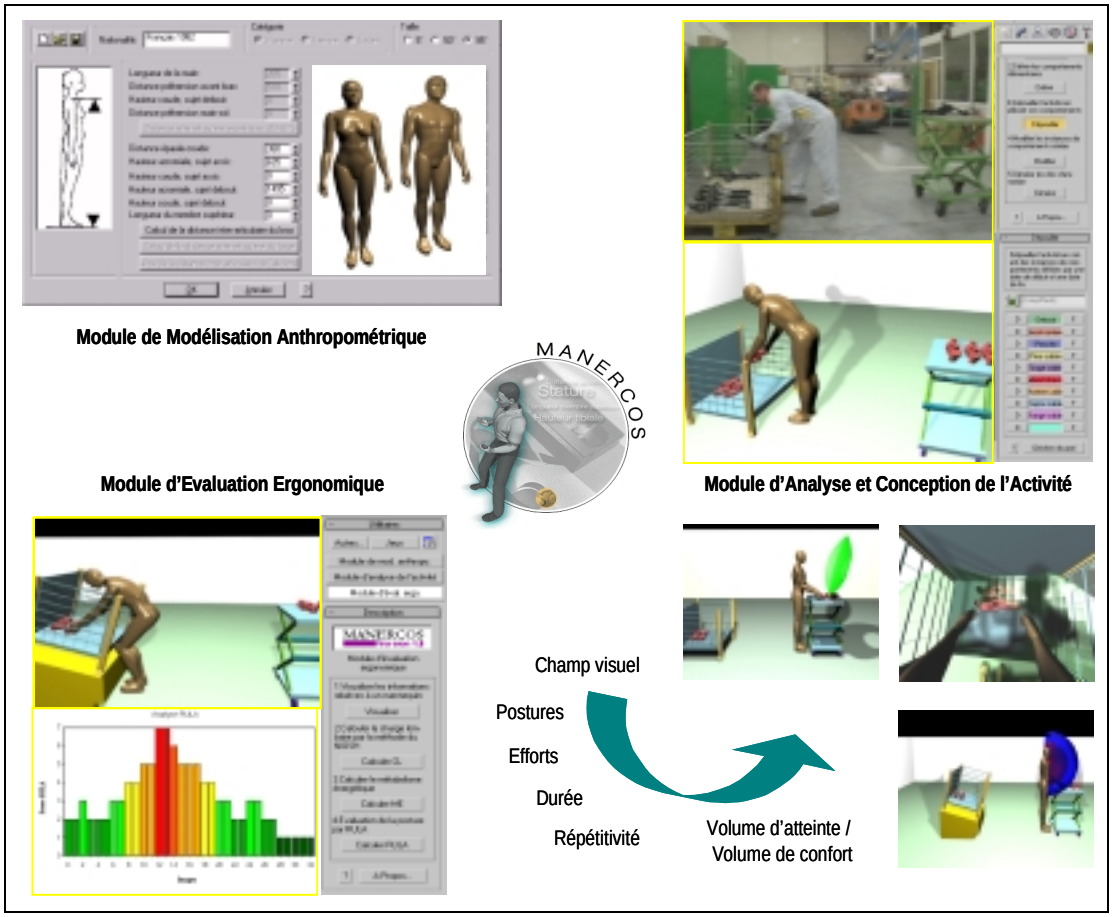


Figure II.9 MANERCOS - Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes [d'après Chitescu et col., 2003b]

Ainsi ces modules distincts et en même temps complémentaires sont :

- un **Module de Modélisation Anthropométrique**, qui permet la génération des mannequins, de différentes tailles et appartenant aux différentes populations, à partir de données issues d'un gestionnaire de données anthropométriques et d'un gestionnaire de postures ;

- un **Module d'Analyse de l'Activité**, qui favorise la définition et la simulation de scénarios d'activités humaines, existantes ou futures, à l'aide d'un gestionnaire de comportements élémentaires. Plus précisément, à l'appui de celui-ci, un autre gestionnaire d'activités permet d'analyser une activité réelle à partir d'un film vidéo facilitant sa reproduction, mais également de concevoir une activité future, complètement nouvelle, aspect sur lesquels nous reviendrons plus loin;

- un **Module d'Evaluation Ergonomique**, qui intègre *plusieurs méthodes ergonomiques classiques* adaptées pour évaluer "les activités virtuelles" des "humains virtuels" mises en contact avec "des produits/systèmes virtuels". Il s'agit, par exemple, de la *méthode NIOSH* (National Institute for

Occupational Safety and Health) *d'évaluation globale de la charge maximale admissible* permettant de connaître les risques de lombalgies liées aux opérations de manutention, en accord avec les travaux de Waters [Waters, 1993].

Une deuxième méthode est liée à *l'évaluation de la dépense énergétique consécutive à l'utilisation d'un produit*, en accord avec les travaux de SPITZER-HETTINGER [Spitzer,1965 cité par Gomes,1999], travaux qui font l'objet d'une norme ISO 8996 intitulée : "Détermination de la production de chaleur métabolique" [AFNOR,1995].

D'autres évaluations sont également possibles, parmi lesquelles nous pouvons citer *le champ visuel, le volume de confort et le volume d'atteinte,* en accord avec la norme AFNOR X35-101 intitulée *"Spécifications ergonomiques pour la conception des dispositifs de signalisation et des organes du service – Champ visuel"* et la norme X35-104 intitulée *"Sécurité des machines. Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines" ;* mais nous y reviendrons.

II.2.4.1 Modélisation Anthropométrique

La modélisation numérique du corps humain s'appuie notamment sur la géométrie (formes et proportions) et l'anatomie du corps humain, mais également sur les comportements mécaniques des articulations et de tissus biologiques pour les modèles numériques les plus avancés.

L'aspect biomécanique du corps humain

La modélisation biomécanique du corps humain représente la modélisation de son aspect cinématique. Il s'agit de la reproduction virtuelle **des différents segments corporels** *(bras, avant-bras, cou, jambe,…)* liés par des pivots modélisant **les différentes articulations** *(épaule, poignet, coude, genou,…)*. Ces derniers ont **un rôle de contraintes** imposant *un nombre limité de degrés de liberté* aux segments corporels et permettant *une configuration de la structure cinématique proche de celle de l'être humain*. **La modélisation des chaînes cinématiques de l'humain** représente alors **l'étape primordiale** du développement de ce type d'outil.

Les mannequins numériques développés jusqu'à présent ont des **structures cinématiques très variées**, en raison du nombre des segments corporels et d'articulations correspondant qui différent d'un outil à l'autre (Cf. Annexe A2). Ainsi, *l'outil Safework présente une structure cinématique comportant 100 segments indépendants et 148 degrés de liberté* [Goussu,2000], tandis que *le logiciel Jack dispose seulement de 69 segments corporels, 68 articulations et 138 degrés de liberté* (Figure II.3) [Coze,2000].

Par rapport à ceux-ci, **MANERCOS** propose *un modèle avec une structure cinématique "assez modeste",* car il contient seulement 17 segments corporels et 16 articulations. Evidemment, le mieux est de pouvoir représenter un corps humain le plus réaliste possible, et cela guide le développement actuel de l'outil MANERCOS. C'est d'ailleurs la tendance actuelle de la recherche dans ce domaine, qui s'oriente vers la modélisation de **structures cinématiques de niveaux très détaillés**, avec un **nombre de plus en plus important de segments corporels et d'articulations**, notamment pour certaines parties du corps: main, pied, colonne vertébrale.

En effet, en plus de la meilleure apparence qu'elles donnent au mannequin virtuel, ces caractéristiques cinématiques aident à le placer dans la position spécifique de son environnement de travail, à le faire évoluer en fonction des caractéristiques de la tâche qu'il réalise et à évaluer les éventuelles contraintes de mouvements pendant son activité [Ruisseau,2000].

L'aspect anthropométrique du corps humain

L'anthropométrie représente **la technique de mensuration des dimensions humaines** [Pheasant,1996]. Plus précisément, cela a pour objectif la mesure dimensionnelle des différents segments corporels, l'étude de leur variabilité interindividuelle et même leur évolution dans le temps [AFNOR 1995 - Norme NF 35 – 003 – intitulée "Mesures anthropométriques de base. Définitions"; Greil et col,2000]. La variété anthropométrique de la population est considérée comme un des aspects de base de la modélisation de l'être humain.

Pour illustrer cela, nous considérons le cas de l'aménagement d'un poste de travail ou la conception d'un futur poste de travail, mieux adapté à l'opérateur, qui demande des informations quantitatives sur les dimensions et les formes de ce dernier [Wang,2000]. Naturellement, il est impossible de reproduire tous les êtres humains avec leurs dimensions variables. Et d'un point de vue dimensionnel, le mannequin doit être représentatif de la population ciblée, futurs opérateurs du poste de travail étudié. Il existe ainsi des mannequins standard de **centiles particuliers (5ème, 50ème et 95ème),** mais ils ne semblent pas suffisants pour l'évaluation et la re-conception dimensionnelle du poste de travail. Plusieurs exigences dimensionnelles doivent être simultanément considérées et cela impose la création d'ensembles de dimensions cohérentes pour des individus représentatifs. Il s'agit ainsi de pouvoir accéder à **des données multivariées** [Verriest,2000].

En effet, certains des mannequins numériques actuels disposent d'un **module anthropométrique évolué** (voir Annexe A2) permettant l'utilisation des caractéristiques anthropométriques d'un échantillon particulier de population, la création d'échantillons spécifiques à partir de bases de données déterminées, l'ajustement des caractéristiques anthropométriques pour un individu et même la projection de populations sur un horizon de cinq, dix ou quinze ans [Ruisseau,2000; Verriest,2000].

Le logiciel SAFEWORK, par exemple, permet la réalisation de n'importe quel être humain, appartenant à n'importe quel type de nationalité [Goussu,2000]. Par l'utilisation de "la technique multinormale unique", il assure la "correspondance réel – virtuel" pour les mannequins créés. Il permet l'accès aux plus récentes bases de données statistiques de la population, homme et femme **(US ARMY Natick, NASA STD 3000, MIL – STD - D, Armée Française, etc.),** bases de données qui contiennent les variables anthropométriques, les écarts types, les valeurs percentiles et les corrélations entre les variables. Ces bases de données anthropométriques peuvent être modifiées ou créées en fonction de l'application.

C'est aussi le cas de **l'outil MANERCOS** qui dispose de données anthropométriques représentatives de la population française et chinoise (Homme et Femme, **5ème, 50ème et 95ème percentile**) [Rebiffé,1982; Pheasant,1996; Pheasant,2001], mais qui autorise, selon le besoin, l'addition d'autres populations de différentes nationalités. De plus, MANERCOS permet la création et la modification de la posture du modèle numérique qu'il génère par la suite dans la scène 3D réalisable grâce au logiciel 3D Studio Max. Cela représente l'environnement virtuel dans lequel ce modèle 3D de l'humain sera amené à simuler par la suite différents gestes et postures de l'Humain.

Il s'agit par exemple, pour la conception d'un système de travail qui se trouve en phase numérique, de générer un mannequin numérique dans l'environnement virtuel qui entoure la maquette numérique du futur système de travail. L'objectif est ensuite de le faire agir sur cette dernière, afin de pouvoir faciliter son étude et son évaluation et la modifier par la suite. Pour mieux expliquer cela, il convient alors de présenter la manière selon laquelle les mannequins numériques, dont MANERCOS, peuvent intervenir pour la modélisation d'un système Homme – Produit – Environnement et les interactions qui apparaissent entre ses composantes.

II.2.4.2 Modélisation numérique du système Homme – Produit - Environnement

La modélisation Tri-Dimensionelle d'un produit et de son environnement est possible grâce à de nombreux outils et logiciels de CAO (AutoCad, ProEngineer, CATIA V5, SolidWorks, etc.). Le **passage du "réel au numérique"** se fait ainsi de plus en plus facilement, les délais de modélisation deviennent de plus en plus courts et les coûts diminuent.

La modélisation numérique du système "Homme – Produit – Environnement" implique alors l'intégration ou la génération des mannequins numériques dans l'environnement développé par des outils de CAO, qui demande une compatibilité entre ces deux types d'outils, une liaison qui doit permettre un échange de données entre ces outils. Plusieurs possibilités de transfert sont possibles aujourd'hui, ainsi:

- soit *les logiciels de CAO permettent l'intégration directe des modèles numériques dans l'espace*

virtuelle "Produit - Environnement" créé, comme c'est le cas du logiciel Safework intégrable dans l'environnement CAO de l'outil CATIA V5 (Dassault System) [Delmia,2000b];

- soit *les deux types d'outils CAO et mannequins numériques permettent la réalisation indépendante de la modélisation*, mais ils présentent *des fonctionnalités d'importation et d'exportation de fichiers* de formats communs de type : *HTLM, VRML, STL, IGES* (voir paragraphe Abréviations). C'est le cas par exemple du mannequin numérique Jack [Coze,2000] ;

- soit *les modélisations du Produit et de l'Environnement se font dans l'espace de travail du mannequin numérique*, comme c'est le cas de l'outil MANERCOS [Gomes,1999]. Support de ce dernier, le logiciel 3D Studio Max permet également l'importation de l'environnement virtuel réalisé à l'aide d'un autre outil de CAO.

La première variante est intéressante pour le processus de conception, favorisant à travers l'intégration du mannequin numérique dans l'environnement CAO la modélisation plus facile du système Homme - Produit - Environnement. De plus, des modifications rapides de l'environnement ou du produit seront ainsi possibles facilement, selon les évaluations ergonomiques faites à l'aide des mannequins numériques, aspects sur lesquels nous reviendrons plus loin.

La dernière variante est efficace pour un environnement simple pour lequel la modélisation ne demande pas beaucoup de fonctionnalités au logiciel de modélisation de l'humain.

Après les aspects évoqués ci-dessus, il convient de présenter la capacité des outils de type mannequins numériques *à modéliser et simuler les Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain* qui correspondent aux interactions qui apparaissent dans le système Homme – Produit – Environnement.

II.2.4.3 Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain

La modélisation et la simulation numérique de gestes et postures de l'Humain est possible à l'aide des outils de type mannequins numériques, mais cela n'est pas une tâche facile pour des raisons liées notamment à la variété et la complexité des états comportementaux de l'humain. Pour ce faire, les mannequins numériques doivent alors disposer de fonctionnalités et de méthodes efficaces pour pouvoir atteindre un niveau élevé de fidélité virtuelle comportant: *la reproduction des mouvements par manipulation facile des segments corporels*, *une meilleure définition de la gestuelle (main et pied) pour l'évaluation des différentes interfaces*, *la représentation réaliste de la posture*, *la modification aisée de la posture du modèle humain*, *la représentation réaliste de la compression des tissus et de la déflexion à l'interface avec des surfaces de contact déformables, etc.*

Il existe ainsi *plusieurs méthodes de modélisation et simulation des Activités Gestuelles et Posturales de l'humain*, mais aucune n'est pas "parfaite" et seule une combinaison de celles-ci peut conduire à de

bons résultats [Badler,1997; Thalmann,1999; Aggarwal,1999].

Ainsi, la **méthode traditionnelle de modélisation des mouvements humains** consiste dans *l'animation des articulations du modèle contrôlée par une* ***cinématique directe*** ou ***indirecte.*** C'est le cas, par exemple, des outils RAMSIS et SAFEWORK (Cf. Annexe A2).

La capture de mouvements est une autre méthode qui s'appuie sur *la récupération des mouvements réels des articulations du corps humain* [Liu et coll,1999]. Cela suppose l'utilisation de capteurs pour le recueil des angles des différentes articulations. Le fichier de données ainsi enregistré sera ensuite intégré dans le logiciel de type mannequin numérique permettant le transfert des données sur un des modèles numériques générés par ce denier.

Ces deux méthodes sont assez compliquées et l'animation des mouvements nécessite un temps énorme et de coûts élevés. De plus, elles se caractérisent par un manque de réalisme. Ainsi, Liu et ses collaborateurs [Liu et coll,1999] ont proposé une autre *méthode basée sur des enregistrements vidéo des activités humaines,* qui consiste dans la superposition manuelle du modèle 3D du mannequin numérique sur l'image 2D du film enregistré, permettant ainsi la reproduction des activités physiques humaines avec un certain réalisme. Cette méthode est utilisée dans une certaine mesure par les mannequins numériques RAMSIS et PCMAN [Seitz,2000] pour déterminer les dimensions anthropométriques, notamment par les modelés anthropométriques de sujets enregistrés, mais aussi pour reproduire leurs postures, voire leurs mouvements.

L'outil MANERCOS s'appuie sur le même principe, mais il permet une analyse plus détaillée des films vidéographiques contenant l'activité humaine et cela à travers son Module d'Analyse de l'Activité. ***Celui-ci fait d'ailleurs de MANERCOS, un outil particulier par rapport aux autres mannequins numériques.***

A l'appui du logiciel KRONOS [Kuerguelen,1997] qui est *un outil d'observation et d'analyse de l'activité*, ce module a été conçu pour ***étudier, reproduire et évaluer*** *les Activités Gestuelles et Posturales Réelles d'un Homme réel* à partir de films vidéographiques. Ainsi, les dépouillements de films vidéographiques possibles grâce à ce module aident à la fois pour ***la définition de scénarios d'animation reproduisant les Activités Gestuelles et Posturale***s, mais également pour **l'analyse statistique des activités observées** *(fréquence et temps de manipulation, prise d'informations etc.).* Les résultats issus de l'outil MANERCOS sont alors à la fois **qualitatifs** *(films de synthèse représentant les Activités Gestuelles et Posturales simulées)*, mais aussi ***quantitatifs*** *(résultats statistiques de l'analyse des Activités Gestuelles et Posturales)*.

D'autres mannequins numériques, dont par exemple Jack, permettent la modélisation des Activités Gestuelles et Posturales d'utilisation d'un produit à l'aide d'une fonctionnalité basée sur des algorithmes prédictifs [Barthelat,2001].

Malgré les méthodes évoquées, la modélisation de l'activité de l'humain est encore loin d'être parfaite avec ces outils numériques. En conséquence, des travaux de recherche sont menés en vue d'améliorer, voire de faciliter l'animation des activités humaines à travers les mannequins numériques et qui semblent pouvoir apporter beaucoup plus, notamment pour la conception anthropocentrée de produits.

Après avoir montré comment il est possible de simuler des comportements humains grâce aux mannequins numériques, dont MANERCOS, il convient maintenant de présenter les évaluations ergonomiques réalisables avec ces mêmes outils.

II.2.4.4 Evaluation ergonomique du système "Homme – Produit – Environnement" à travers l'évaluation ergonomique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain

L'intérêt que nous portons à la conception ergonomique des produits industriels et des systèmes de travail, nous amène à étudier dans ce paragraphe *"les contraintes des activités physiques"* qui peuvent apparaître à l'exploitation de ceux-ci par les opérateurs. En effet, comme nous l'avons déjà évoqué dans la première partie de ce rapport, ces "contraintes physiques de travail" agissent sur *le confort, la santé, et la sécurité* des opérateurs, favorisant l'apparition des *maladies professionnelles*, dont *des Troubles Musculo-Squelettiques. Il devient ainsi nécessaire d'évaluer ces risques avant même qu'ils ne se produisent, c'est-à-dire dès la conception de ces systèmes de travail*. Cela est possible grâce à *la simulation des Activités Gestuelles et Posturales de travail*, réalisée par les mannequins numériques sur les maquettes numériques, pré-concepts des futurs systèmes de travail. L'évaluation ergonomique des ces Activités Gestuelles et Posturales Simulées est possible à travers les modules ergonomiques dont les mannequins numériques disposent aujourd'hui, modules qui s'appuient, comme déjà évoqué, sur des normes et critères ergonomiques liés *à l'encombrement, à l'accessibilité, à la visibilité, aux contraintes biomécaniques…* La figure II.10 illustre d'ailleurs certaines évaluations ergonomiques possibles à travers ces outils, évaluations que nous détaillons par la suite.

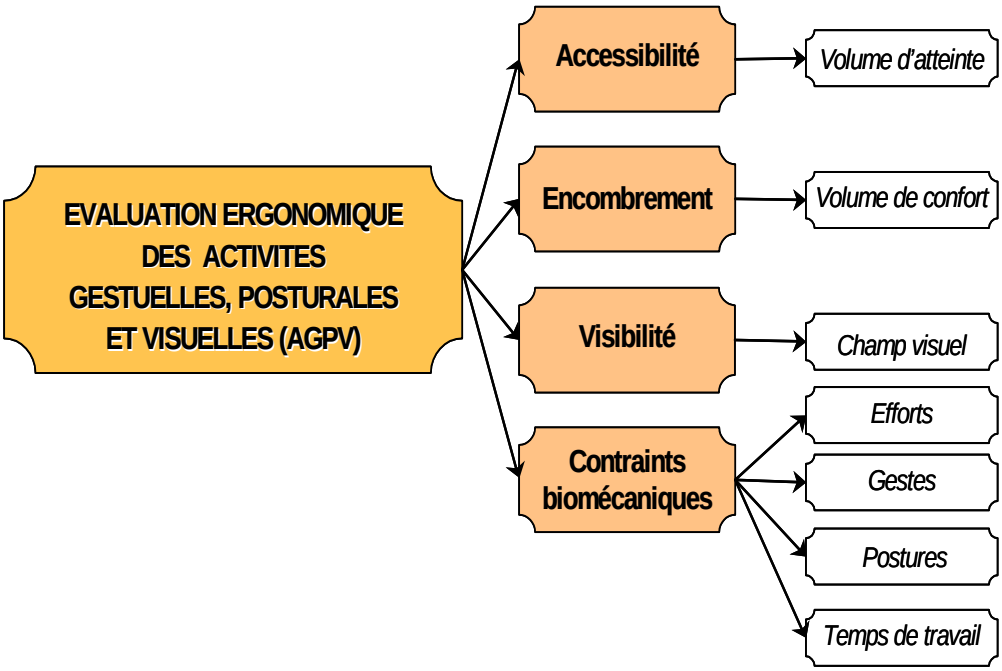


Figure II.10 Evaluations ergonomiques possibles à travers les mannequins numériques, dont MANERCOS

Evaluation de l'accessibilité et de l'encombrement

Il s'agit par exemple, pour un cas de conception d'un poste de travail, de déterminer, à l'aide des mannequins numériques, les emplacements des commandes, les plans de travail, de définir les voies de passage, etc. et cela par la modélisation des *zones maximales d'atteinte* et de *l'encombrement corporel* des futurs opérateurs [Jolif,2000].

Ainsi, l'**évaluation de l'accessibilité** à l'aide des mannequins numériques s'appuie sur la notion de **volume d'atteinte**, tant *manuelle* que *digitale.* Ainsi, le **volume d'atteinte manuelle** représente *le volume limite de travail à l'intérieur duquel une commande peut être saisie*, tandis que le **volume d'atteinte digitale** représente *le volume limite de travail à l'intérieur duquel une commande peut être touchée avec le bout du doigt*. Ces deux volumes permettent d'évaluer uniquement ***l'accessibilité des commandes***.

L'évaluation de l'encombrement consiste dans l'étude des interférences existant entre l'Homme (*Opérateur*) et le Produit (*Poste de travail, Outil, Machine,…*) ou l'Environnement (*Atelier, Halle,…*). Pour étudier par exemple ***la manipulation des commandes***, les mannequins numériques utilisent le **volume de confort manuel**. Celui-ci est représenté par *l'espace décrit par le membre supérieur lorsque chacune de ses articulations explore les limites des angles de confort*, valeurs recommandées par la norme **NF X 35 – 104** intitulée *"Postures et dimensions pour l'Homme au travail sur machines et appareils"* [AFNOR,1995].

Il apparaît important de préciser que les notions de *volumes d'atteinte et de confort* sont valables aussi dans les évaluations concernant l'accessibilité et l'encombrement au niveau des membres inférieurs (ex: commandes à pied).

L'outil MANERCOS (figure II.9), comme la plupart des mannequins numériques (Cf. Annexe A2), permet aussi la réalisation de ces évaluations (volume d'atteinte et de confort). Cependant, *des améliorations peuvent être apportées à cet outil,* notamment en terme ***de détection des interactions entre le mannequin numérique et les objets virtuels*** qui appartiennent à la scène virtuelle dans laquelle il a été généré. Relativement à cela, parmi les mannequins numériques, certains disposent de **modules de détection de collisions** permettant à l'utilisateur de détecter, de vérifier, d'analyser et de simuler les contacts entre l'homme virtuel et les objets composants de l'environnement (Cf. Annexe A2). C'est le cas par exemple des logiciels SAFEWORK [Goussu,2000] ou JACK [Coze,2000].

L'évaluation de la visibilité

La plupart des outils de modélisation humaine, dont MANERCOS, disposent d'un **module de vision** permettant la représentation du *champ visuel du mannequin* et donc de sa **vision** (Cf. Annexe A2). Ainsi, le champ visuel est essentiel, par exemple dans la conception d'un système de travail, pour étudier la visibilité que le mannequin numérique, représentant du futur opérateur, peut avoir sur la maquette numérique, dont le futur système de travail, et sur l'environnement associé. Il est ainsi possible d'identifier et d'évaluer, par exemple, le niveau de "gêne visuelle" que la disposition des commandes sur le futur système de travail pourra provoquer chez le futur opérateur.

Les recherches conduites à ce sujet mettent en évidence ***la construction et la division géométrique du champ visuel*** [Joliff,2000]. Ainsi, ***l'évaluation de la visibilité*** à l'aide des mannequins numériques se fait par ***la simulation du champ visuel***, *du* ***cône de vision*** et par *la* ***projection du champ visuel sur le produit et son environnement***. Pour cela, des cameras virtuelles sont placées au niveau des yeux du mannequin numérique qui permettent la génération des images de synthèse et ainsi la *simulation des "vues"* de l'homme virtuel, représentant du futur opérateur. Ces images servent ensuite à *l'évaluation des zones visibles ou non d'un système de travail et de son environnement*. *L'évaluation du champ de vision* est possible par la superposition des graphiques représentant les dimensions standard du champ de vision (Norme **NF X 35 – 101 –** *intitulée "Le champ Visuel"*) sur les images de synthèse obtenues auparavant.

Il convient d'évoquer que pour certains des mannequins numériques, le module d'évaluation de la visibilité offre plus de possibilités. C'est le cas du logiciel SAFEWORK qui permet le choix entre quatre types de vision: **binoculaires, ambinoculaire, monoculaire (droit et gauche) et stéréo**

[Goussu,2000]. L'évaluation de la vision est possible dans ce cas à l'aide de plusieurs paramètres que nous évoquons, sans entrer dans les détails, tels que **le cône central**, **les cônes périphériques**, **la tache aveugle**, **la ligne de vision**, **de grilles couvrant le champ de vision**, etc.
Relatif à cela, l'outil MANERCOS peut être encore amélioré, afin de pouvoir permettre une évaluation encore plus précise.

L'évaluation des contraints biomécaniques

L'évaluation des activités simulées et des contraintes biomécaniques qui en découlent se déroule de la même manière que l'évaluation des activités humaines réelles, par l'analyse et l'évaluation des postures, des efforts, la répétitivité de gestes, de temps (durées) de travail etc.
En général, l'analyse ergonomique des activités physiques humaines s'appuie sur une palette de méthodes et d'outils [Malchaire,2001], parmi lesquels on peut citer RULA, OWAS, NIOSH, la méthode d'évaluation de la dépense énergétique etc. Aucune de ces méthodes n'est "idéale" et le choix parmi elles dépend beaucoup du contexte d'utilisation (Cf. Annexe A3).
Ainsi, la **méthode RULA** (**R**apid **U**pper **L**imb **A**sessment) est destinée à l'évaluation biomécanique "globale" de l'activité des membres supérieurs, car elle dispose de grilles d'évaluation qui prennent en compte les gestes, les postures, mais également les efforts et la répétitivité des gestes [Mc Atamney,1993].

La **méthode OWAS** (Ovako Working position Analysing System) est également spécifique à l'évaluation des postures et de la répétitivité des gestes de l'Homme [Louhevaara,1992].

La **méthode NIOSH** (National Institute for Occupational Safety and Health) permet l'évaluation de la charge maximale admissible à la manutention des objets par l'Homme [Waters,1993].

La **méthode d'évaluation de la dépense énergétique** permet le calcul du métabolisme énergétique de chaque individu humain selon le type de l'activité (travail avec les mains, travail avec un bras, etc.), de la posture (assise, agenouillé, débout,…) et la vitesse de déplacement de celui-ci [ISO 8996 - NF EN 28996].

La plupart des mannequins numériques disposent de modules ergonomiques qui intègrent les méthodes évoquées et permettent ainsi l'évaluation des contraintes biomécaniques des activités physiques simulées. Parmi ceux-ci, nous citons les logiciels JACK [Coze,2000; Tarzia,2000], SAMMIE, SAFEWORK , etc. (Cf. Annexe A2).
Il convient de rappeler que le Module d'Evaluation Ergonomique de l'outil MANERCOS dispose de *la*

méthode NIOSH et de la *méthode d'évaluation de la dépense énergétique*, mais qu'il fournit également des données statistiques relatives *à la répétitivité des gestes* et à *la durée des activités étudiées*.

Nous mentionnons que l'outil MANERCOS ne permettait pas au départ l'évaluation posturale des activités simulées, évaluation si nécessaire pour nos objectifs de recherche. C'est ainsi que nous avons pu participer à *des travaux d'adaptation et d'intégration de la méthode d'évaluation posturale RULA dans cet outil.*

Dans ce paragraphe nous avons évoqué les outils de type mannequins numériques, dont MANERCOS, et à travers *la description de leurs capacités et fonctionnalités*, nous avons mis en évidence de manière générale *leur intervention actuelle dans le processus de conception ergonomique de produits, notamment industriels.* Ces produits soulèvent encore des problèmes d'usage que nous avons largement évoqués dans la première partie du document. Relativement à cela, ***MANERCOS semble pouvoir apporter un plus pour le processus de conception anthropocentrée, notamment à travers son module d'Analyse de l'Activité,*** et c'est ce que nous allons montrer dans le paragraphe suivant.

II.3 L'intégration de la méthode de simulation numérique des activités physiques humaines à l'aide du mannequin numérique MANERCOS dans la méthodologie de conception centrée sur l'Homme

Il convient d'évoquer ici que "notre préférence" pour l'outil MANERCOS est liée certainement au lieu de notre recherche, le laboratoire SeT-ERCOS où cet outil a été développé, mais surtout au potentiel que celui-ci semble avoir pour la conception de produits.
En effet, cet outil et ses applications semblent bien s'associer à la **"philosophie actuelle de l'approche de conception de produits basée sur le numérique".**

Depuis sa proposition en 1999 par Gomes [Gomes,1999] et jusqu'à présent, le mannequin numérique MANERCOS a été utilisé pour :

- *l'évaluation ergonomique des maquettes numériques de produits existants* (l'étude d'un module de confort automobile) [Gomes,1999; Barthelat,2001],

- *l'étude de l'accessibilité à bord d'une automobile* [Rapport ERCOS,2001; Rapport ERCOS,2002],

- *l'évaluation ergonomique de maquettes numériques, pré-concepts proposés pour des futurs postes de travail* (l'étude d'un poste de manutention de pièces lourdes) [Barthelat,2001]. A celles-ci s'ajoute également *l'étude de conception du mobilier de cuisine* réalisée par Leborgne dans le cadre de ses travaux de doctorat [Leborgne,2001].

Ces études ont mis en évidence, pour l'outil MANERCOS, des similitudes avec les autres mannequins numériques, mais également des particularités sur lesquelles nous reviendrons.

Malgré *une utilisation "partielle" de cet outil,* donc de certaines de ses fonctionnalités, due notamment à des travaux de développement en cours, *ces applications ont encouragé pour une meilleure exploration et exploitation.*

Ainsi, il est apparu nécessaire ***de revoir et repenser la démarche d'utilisation proposée initialement pour l'outil MANERCOS*** [Gomes,1999] et *d****e mieux l'adapter au processus de conception anthropocentrée de produits***. C'est d'ailleurs **une des missions de notre recherche de doctorat** que nous présentons par la suite. Mais avant tout, nous rappelons notre intérêt pour la conception de produits industriels, dont de systèmes de travail, vers lesquels nous concentrons ces travaux.

Ainsi, par rapport aux autres mannequins numériques utilisés surtout pendant **la phase d'études préliminaires** de la conception, pour aider à l'évaluation ergonomique des plusieurs maquettes numériques, préconcepts proposés pour le système de travail à concevoir, MANERCOS est capable d'intervenir encore avant, dès la **phase d'étude de faisabilité**. En effet, selon le besoin de re-conception ou conception d'un système de travail, identifié par une entreprise, l'outil MANERCOS **encourage deux types d'interventions**. Il permet ainsi *d'analyser des systèmes de travail existants* et *d'aider à leur re-conception* et de passer ***d'une "ergonomie de correction" à "une ergonomie de conception"*** de ces systèmes. De plus, il est capable de guider la conception d'un système de travail complètement nouveau, pour lequel il n'y a pas de références, favorisant ainsi ***la résolution du paradoxe de l'ergonomie de conception*** déjà évoqué. Et selon ces interventions, deux démarches d'utilisation du mannequin numérique MANERCOS peuvent être formalisées ainsi :

- pour l'évaluation d'un système de travail existant et la re-conception d'un système de travail nouveau *(de l'ergonomie de correction vers l'ergonomie de conception)*;

- pour la conception d'un nouveau système de travail *(résolution du paradoxe de l'ergonomie de conception)*.

C'est grâce à sa capacité à modéliser, à simuler, à évaluer et à faire évoluer des Activités Gestuelles et Posturales de travail des opérateurs, que les interventions de MANERCOS sont possibles sur la conception de ces systèmes de travail. Les Activités Gestuelles et Posturales Simulées de travail constituent en effet de *"vrais supports"*, des *"indicateurs"* pour la conception anthropocentrée de futurs systèmes de travail.

Relativement au premier cas, dont celui **de re-conception d'un système de travail** ou **conception d'un nouveau système de travail** selon le schéma illustré par la figure II.11, MANERCOS intervient dès la première phase de la conception pour aider les acteurs participants **à analyser et évaluer les Activités Gestuelles et Posturales Réelles de l'opérateur sur le système de travail étudié**. Pour ce faire, il est nécessaire d'abord ***d'observer, d'enregistrer et d'analyser*** le système **H**omme (Opérateur) – **P**roduit (Système de travail) – **E**nvironnement de travail, en vue de le modéliser à l'aide des outils de CAO et du mannequin numérique MANERCOS. C'est la mission de l'ergonome, avec la participation du concepteur. A l'appui de l'observation et de l'analyse des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) des opérateurs à partir de films vidéo enregistrés, faites par l'ergonome, l'étape suivante consiste dans la modélisation et la simulation des ces activités GP à l'aide de MANERCOS, qui doit aboutir sur un film virtuel (format .AVI). Cela doit se faire avec un degré de fidélité élevé et pour cela nous considérons nécessaire d'étudier par la suite l'écart existant entre ces activités GP simulées (film virtuel) et les activités réelles (film réel).

Si l'écart est important, il faut revoir les films vidéos et ensuite modéliser et simuler à nouveau les activités GP réelles de travail à l'aide de l'outil MANERCOS et de son support 3D Studio Max. Si l'écart est réduit, voire nul (situation quasi-impossible), les activités GP simulées sont évaluées par la suite, par rapport à de critères ergonomiques choisis en fonction du système de travail étudié. Les résultats de ces évaluations, comparés avec les valeurs existantes dans les normes et standards ergonomiques, favorisent la définition de gestes et postures futurs souhaitables en termes de confort, santé et sécurité pour les futurs opérateurs. Et celles-ci sont intégrées par la suite, sous forme de recommandations, dans le Cahier de Charges Fonctionnel (CdCf) du futur système de travail. La participation de l'ergonome est importante dans cette phase, tandis que celle du concepteur se résume seulement à la modélisation numérique du système H-P-E.

Dans la phase suivante (Etudes préliminaires), comme nous l'avons déjà évoqué, MANERCOS permet aux acteurs de conception, à travers la simulation de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS), de proposer plusieurs pré-concepts, maquettes numériques du futur système de travail.

Ainsi, dans une première étape, ces Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS), simulées à l'aide du mannequin numérique MANERCOS, **assistent les concepteurs à la recherche d'idées et à la définition de plusieurs préconcepts du futur système de travail** et ensuite à **la modélisation des plusieurs systèmes H-P-E futurs souhaitables.**

L'étape suivante consiste dans **la modélisation et la simulation des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF)** correspondant aux **activités possibles** des futurs opérateurs sur les préconcepts ainsi définis.

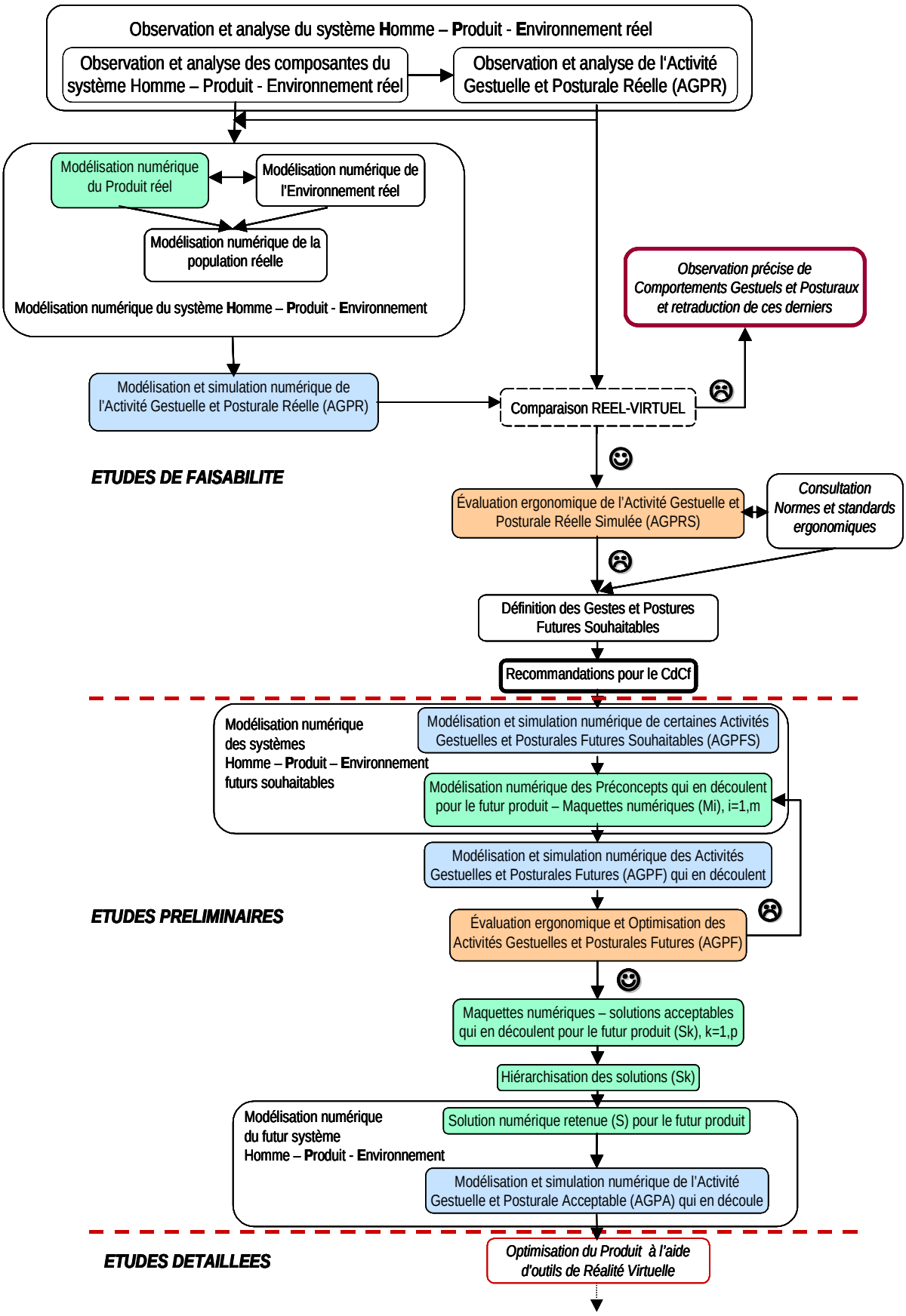

Observation et analyse du système Homme – Produit - Environnement réel
Observation et analyse des composantes du système Homme – Produit - Environnement réel
Observation et analyse de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR)
Modélisation numérique du Produit réel
Modélisation numérique de l'Environnement réel
Modélisation numérique de la population réelle
Modélisation numérique du système Homme – Produit - Environnement
Observation précise de Comportements Gestuels et Posturaux et retraduction de ces derniers
Modélisation et simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR)
Comparaison REEL-VIRTUEL
ETUDES DE FAISABILITE
Évaluation ergonomique de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle Simulée (AGPRS)
Consultation Normes et standards ergonomiques
Définition des Gestes et Postures Futures Souhaitables
Recommandations pour le CdCf
Modélisation numérique des systèmes Homme – Produit – Environnement futurs souhaitables
Modélisation et simulation numérique de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS)
Modélisation numérique des Préconcepts qui en découlent pour le futur produit – Maquettes numériques (Mi), i=1,m
Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF) qui en découlent
ETUDES PRELIMINAIRES
Évaluation ergonomique et Optimisation des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF)
Maquettes numériques – solutions acceptables qui en découlent pour le futur produit (Sk), k=1,p
Hiérarchisation des solutions (Sk)
Modélisation numérique du futur système Homme – Produit - Environnement
Solution numérique retenue (S) pour le futur produit
Modélisation et simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale Acceptable (AGPA) qui en découle
ETUDES DETAILLEES
Optimisation du Produit à l'aide d'outils de Réalité Virtuelle

Figure II.11 Démarche de conception anthropocentrée pour de nouveaux produits industriels (systèmes de travail) qui s'appuie sur l'outil MANERCOS

Les évaluations ergonomiques de ces activités GPF faites par les ergonomes à l'aide de MANERCOS permettent par la suite, selon le cas, soit de proposer des modifications à apporter aux préconcepts proposés, soit de choisir les maquettes numériques acceptables. De plus, ces évaluations ergonomiques permettent ensuite de hiérarchiser les solutions acceptables retenues pour le futur système de travail, facilitant ainsi la décision des concepteurs concernant le choix d'une solution numérique finale.

L'étape suivante comporte la modélisation et la simulation des Activités Gestuelles et Posturales Acceptables (AGPA) des futurs opérateurs lors de l'exploitation de la maquette numérique retenue pour le futur système de travail, activités nécessaires pour la phase suivante de la conception (Etudes détaillées).

Pour une meilleure compréhension, nous présentons un schéma qui synthétise la transformation des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain tout au long de la démarche proposée (figure II .12)

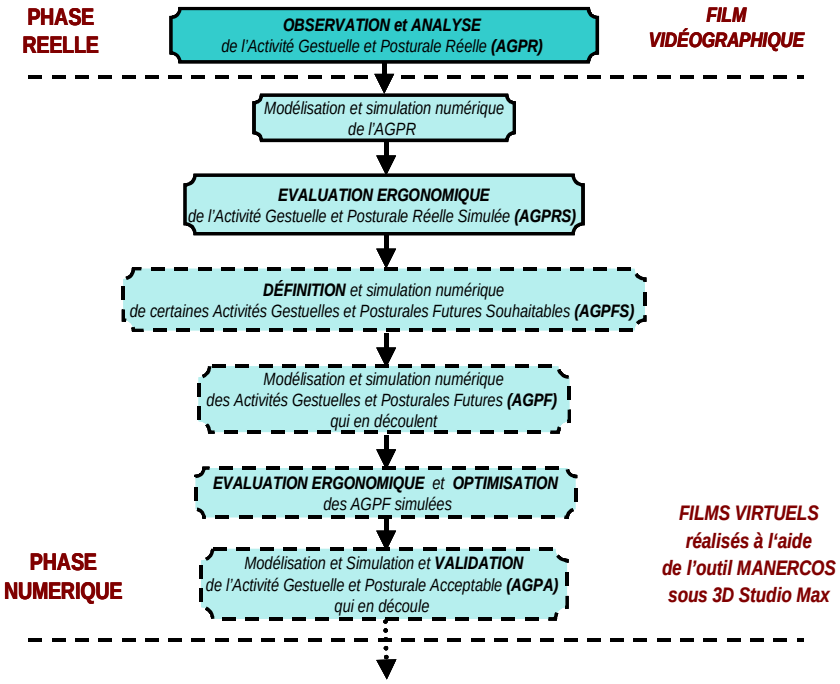

PHASE REELLE
OBSERVATION et ANALYSE de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR)
FILM VIDÉOGRAPHIQUE
Modélisation et simulation numérique de l'AGPR
EVALUATION ERGONOMIQUE de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle Simulée (AGPRS)
DÉFINITION et simulation numérique de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS)
Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF) qui en découlent
EVALUATION ERGONOMIQUE et OPTIMISATION des AGPF simulées
PHASE NUMERIQUE
Modélisation et Simulation et VALIDATION de l'Activité Gestuelle et Posturale Acceptable (AGPA) qui en découle
FILMS VIRTUELS réalisés à l'aide de l'outil MANERCOS sous 3D Studio Max

Figure II.12 L'évolution des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain

Relativement au deuxième cas évoqué, c'est-à-dire **la conception d'un système nouveau de travail**, la démarche d'utilisation de l'outil MANERCOS, est à peu près similaire (figure II.13). La différence apparaît seulement au niveau de la première phase de la conception (Etudes de faisabilité).

Ainsi, à l'appui de normes et standards ergonomiques, mais aussi des résultats des études antérieures de conception (bibliothèques de gestes et postures simulés), il est possible de définir et simuler à l'aide de MANERCOS les gestes et postures souhaitables de l'Humain. Ceux-ci favorisent la définition de critères d'utilisabilité et leur intégration dans le cahier des charges fonctionnel du futur système de

travail.

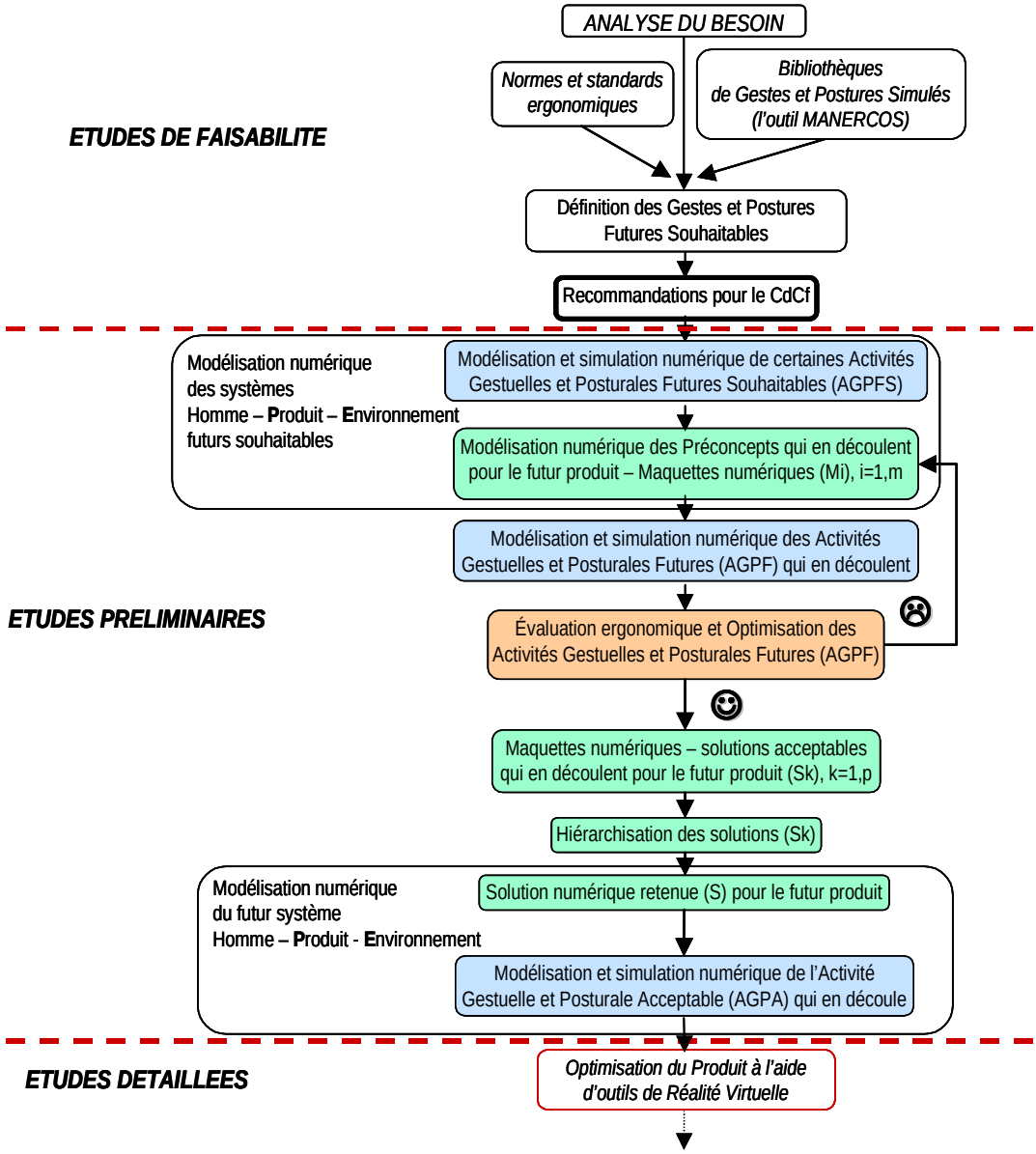

ANALYSE DU BESOIN
Normes et standards ergonomiques
Bibliothèques de Gestes et Postures Simulés (l'outil MANERCOS)
ETUDES DE FAISABILITE
Définition des Gestes et Postures Futures Souhaitables
Recommandations pour le CdCf
Modélisation numérique des systèmes Homme – Produit – Environnement futurs souhaitables
Modélisation et simulation numérique de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables (AGPFS)
Modélisation numérique des Préconcepts qui en découlent pour le futur produit – Maquettes numériques (Mi), i=1,m
Modélisation et simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF) qui en découlent
ETUDES PRELIMINAIRES
Évaluation ergonomique et Optimisation des Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF)
Maquettes numériques – solutions acceptables qui en découlent pour le futur produit (Sk), k=1,p
Hiérarchisation des solutions (Sk)
Modélisation numérique du futur système Homme – Produit - Environnement
Solution numérique retenue (S) pour le futur produit
Modélisation et simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale Acceptable (AGPA) qui en découle
ETUDES DETAILLEES
Optimisation du Produit à l'aide d'outils de Réalité Virtuelle

Figure II.13 Démarche de conception anthropocentrée pour de produits industriels (systèmes de travail) nouveaux qui s'appuie sur l'outil MANERCOS

A partir de cette phase, les étapes sont similaires à celles concernant la conception d'un nouveau système de travail.

Nous avons ainsi présenté les modèles qui permettent, à l'aide de l'outil MANERCOS, une meilleure association de la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales humaines à la méthodologie de conception anthropocentrée. Ensuite, nous allons réaliser l'expérimentation et la validation de ces modèles à travers une application dans le domaine de la conception de systèmes de travail.

Troisième Partie

EXPERIMENTATIONS

TABLE DE MATIERES

IIIeme Partie EXPERIMENTATIONS D'une "*Ergonomie de correction*" vers une *"Ergonomie de conception".* Application à la conception des systèmes de travail 95

Introduction 95

III.1 Contexte de l'expérimentation 96

III.1.1 La demande de l'entreprise LMS 96

III.1.2 Le groupe de travail "GT – LMS" 97

III.1.3 Description de l'activité de filetage et du système de travail associé 98

III.2 Organisation des essais 100

III.2.1 Organisation de l'intervention de l'équipe SeT-ERCOS 101

III.2.2 Objectifs et déroulement des expérimentations 106

III.2.2.1 Objectiver les risques de TMS pendant la Phase 1(Etudes de faisabilité) 106

III.2.2.1.1 Observer et analyser ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR) de filetage 106

III.2.2.1.2 Simuler numériquement et évaluer ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale réelle (AGPR) de filetage 124

III.2.2.1.3 Définir certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail à l'aide d'un mannequin numérique 139

III.2.2.2 Rechercher des solutions pendant la Phase 2 (Etudes préliminaires) 143

III.2.2.2.1 Définir des pré-concepts à travers la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail 143

III.2.2.2.2 Evaluer ergonomiquement les pré-concepts proposés. Choix du meilleur pré-concept 146

III.3 Conclusions de l'étude 158

IIIeme Partie EXPERIMENTATIONS

D'une "*Ergonomie de correction*" vers une *"Ergonomie de conception".* Application à la conception de système de travail

" Une confrontation permanente entre théorie et expérience est une condition nécessaire à l'expression de la créativité."

Pierre Joliot - Extrait de "La recherche passionnément"

Introduction

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons présenté un "nouveau" modèle de conception anthropocentrée de produits. Nous avons insisté sur les phases amont (Etudes de faisabilité et Etudes Préliminaires) du processus de conception, en proposant une "nouvelle" façon d'intégrer la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain.
Pour la mise en œuvre de cette dernière, nous avons retenu un outil de type mannequin numérique MANERCOS, outil que nous avons présenté de façon détaillée.
A travers la proposition de la méthode de simulation numérique des AGP et de l'outil MANERCOS retenu, nous pensons être capable de renforcer le caractère anthropocentré de la conception.

Dans cette troisième partie nous expérimentons la méthodologie de conception anthropocentrée proposée et cela dans le domaine de produits industriels. Il s'agit plus précisément de la conception d'un outil à main et d'un poste de travail, qui signifie, selon l'approche systémique adoptée, la conception d'un système de travail.
En lien étroit avec la partie précédente, nous détaillons uniquement les expérimentations correspondant aux deux premières phases de conception, quand nous vérifions nos "sous-hypothèses interdépendantes" qui concernent la méthode de simulation numérique proposée et l'outil MANERCOS. Nous souhaitons ainsi savoir si le modèle de la **méthodologie** proposée est valide, et dans quelles conditions. Nous voulons ainsi démontrer comment **la méthode** de simulation numérique de l'activité

humaine à travers **les outils** de type mannequin numérique peut s'intégrer dans la démarche de conception en favorisant une meilleure prise en compte des caractéristiques physiques humaines.

Nous présentons les raisons, les objectifs précis, le protocole expérimental et le déroulement de notre intervention lors de la conception d'un système de travail. Les résultats obtenus permettront ainsi de montrer la validité de la méthodologie de conception proposée et donc de la méthode de simulation des Activités Gestuelles et Posturales avec l'outil MANERCOS.

Mode d'expérimentation retenu

Il convient de rappeler que les entreprises actuelles, de plus en plus confrontées aux problèmes de TMS (Troubles Musculo-Squelettiques), souhaitent "revoir" leurs outils, postes de travail, etc., ce qui implique la révision des systèmes de travail dans leur globalité. Préoccupées par ces difficultés, celles-ci demandent de l'aide aux différents organismes et laboratoires de recherches. C'est *le cas de l'entreprise LMS* qui a sollicité notre équipe d'accueil SeT-ERCOS, pour l'étude et la re-conception d'un de ses systèmes de travail, étude placée sur notre responsabilité. Nous avons également pu expérimenter notre méthodologie dans deux autres entreprises, mais pour de raisons de confidentialité nous n'insisterons pas sur les études effectuées. Cependant, nous mentionnons que ces deux études nous ont permis de "préparer le terrain" de la troisième expérimentation correspondant à l'entreprise LMS, celle que nous allons présenter de manière détaillée par la suite.

III.1 Contexte de l'expérimentation

III.1.1 La demande de l'entreprise LMS

Cette application a été réalisée chez LMS, une entreprise française spécialisée dans la production des objets de maroquinerie de luxe. Nous mentionnons que son processus de production se réalise sur un seul site qui comporte un effectif de 160 personnes, population **en majorité féminine** *(83% de femmes)* et **jeune** *(80% âgée de moins de 29 ans)***, dont** 60% de **moins de 3 ans** d'ancienneté.

La demande d'étude faite par l'entreprise a eu pour origine les plaintes de plus en plus fréquentes des opérateurs et **un accroissement du nombre des maladies professionnelles (MP), dont les Troubles Musculo - Squelettiques (TMS)**. Pour illustration, la figure III.1 présente l'évolution des cas de TMS chez LMS pendant la période 1996 – 2002, mettant en évidence une forte augmentation de ces maladies professionnelles dans les deux dernières années.

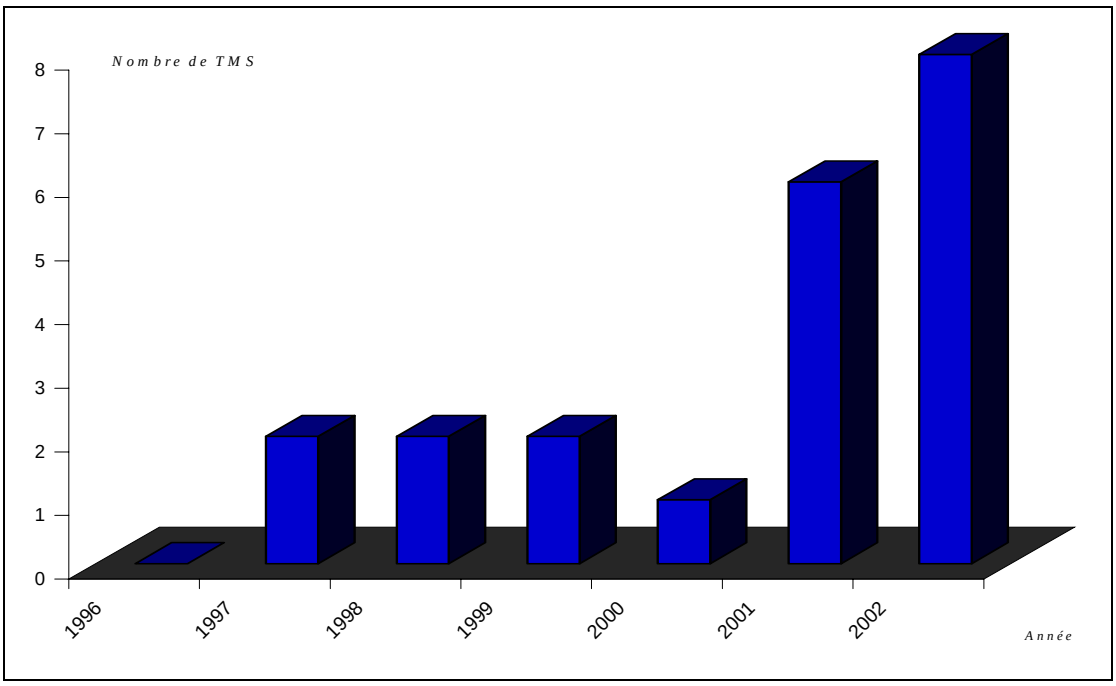


Figure III.1 L'évolution de TMS chez LMS pendant la période 1996-2002

Face à une telle situation, à la fin de l'année 2002, la direction de l'entreprise LMS a souhaité constituer rapidement un groupe de travail avec la *Caisse Régionale d'Assurance Maladie (CRAM) de Franche-Comté*, avec pour objectif *la recherche des causes et bien sûr la proposition de mesures de prévention des risques d'apparition de TMS.*

Ainsi, plusieurs organismes médicaux et de recherche ont été sollicités pour s'associer aux représentants de l'entreprise (*directeur, responsables de production et maintenance, le médecin de travail, le Conseil d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail - CHSCT de Bourgogne, opérateurs*), parmi lesquels nous pouvons citer *la Caisse Régionale d'Assurance Maladie (CRAM) de Franche-Comté, le cabinet d'ergonomie ERGOS et l'équipe de recherche SeT-ERCOS de l'UTBM*. Le **partenariat** ainsi créé, que nous avons baptisé GT-LMS (Groupe de Travail chez LMS), a pu établir un plan d'action précisant les phases et les interventions de chacun des participants.

III.1.2 Le groupe de travail "GT – LMS"

Il convient de préciser que notre objectif n'est pas de présenter l'étude du groupe de travail dans son intégralité, mais d'en extraire *l'intervention de l'équipe de recherche SeT-ERCOS*, qui traduit d'ailleurs *l'application de la méthodologie de conception anthropocentrée proposée* (figure II.1)

Ainsi, en **phase initiale du projet**, le groupe GT-LMS, constitué pour identifier et éclaircir les problèmes de TMS évoqués, a été obligé de rechercher les causes tout au long du processus de production.

En effet, la réalisation d'un produit (ex. sac à main) impose aux opérateurs 351 opérations différentes (ex. assemblage, couture, filetage, griffage, perçage, perlage, etc). De plus, il est important de préciser que chacun des opérateurs réalise un produit du début jusqu'à la fin (durée totale : 10h), il est donc obligé de connaître toutes ces opérations.

Le groupe de travail GT-LMS a pris le temps nécessaire pour *analyser* et *trier* ces activités de travail afin d'identifier celles qui semblaient le plus "à risque". Ainsi, avec la **participation des opérateurs**, trois activités (Couture, Couture - Ponçage autour d'une cale, Filetage) ont été retenues pour une étude plus approfondie. Néanmoins, seules **l'activité de filetage** et **l'activité de couture**, deux activités qui sont les plus pénibles, ont fait l'objet d'expérimentation pour notre équipe de recherche SeT-ERCOS. Nous présentons ici l'activité de filetage pour laquelle nous avons pu réaliser une étude complète.

III.1.3 Description de l'activité de filetage et du système de travail associé

Le filetage est une opération de "finition" du cuir, donc d'amélioration de l'aspect esthétique du produit (sac à main) réalisé par l'opérateur. Elle consiste dans la réalisation ***d'une petite rainure*** sur chacune des marges du cuir, permettant simultanément d'arrondir le matériel et d'évacuer les impuretés et les surplus de colle (figure III.2).

Le matériel (cuir) ou le produit (ex : sac à main) est ainsi préparé pour l'opération suivante qui est le ponçage.

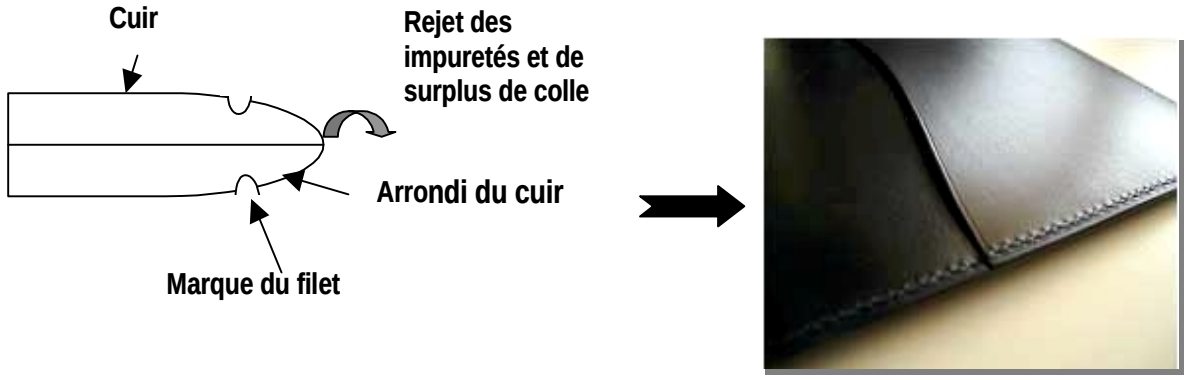


Figure III.2. Présentation de l'opération de filetage

Le filetage est une activité manuelle qui réclame **un outil spécial** très ancien intitulé ***"fer à fileter".*** Celui-ci est composé aujourd'hui d'un ***filet métallique de forme particulière*** qui, grâce à un système de chauffage qu'il intègre, peut atteindre une température 110° C (figure III.3), favorisant "la trace" de filetage. Il est important de mentionner que l'outil antérieur n'était pas chauffé en continu comme actuellement et les périodes de réchauffement de l'outil permettaient aux opérateurs de se reposer.

Avec le fer à fileter à chauffage continu, les opérateurs travaillent en continu, ce qui favorise l'apparition de certains problèmes de santé.

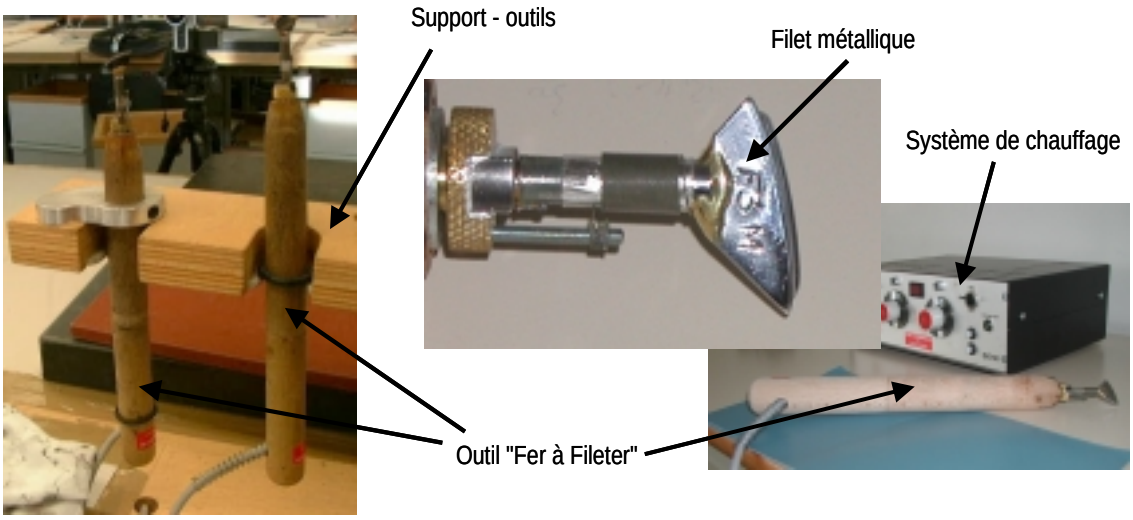


Figure III.3 L'outil à main "Fer à fileter"

Le poste de travail associé à cette opération et à cet outil est illustré dans la figure III.4.

Figure III.4 Système de travail correspondant à l'opération de filetage

Il s'agit du système de travail correspondant à l'opération de filetage, donc selon l'approche systémique adoptée, de l'ensemble des composants "Opérateur - Poste/Outil de filetage – Environnement de filetage".

Il apparaît important de préciser que l'activité de filetage est réalisée en plusieurs étapes :

- *cirage du cuir,*

- positionnement du cuir (en fonction du type, de la forme et des dimensions du cuir),

- positionnement de l'outil de filetage par rapport au cuir,

- contact et appui "outil – cuir",

- marquage sur cuir,

- mouvements aller-retour "outil-cuir".

Ces derniers ont pour but la réalisation d'un filetage uniforme, c'est-à-dire d'un "**marquage continu**" et d'un "**arrondissement homogène**".

D'un point de vue cognitif, l'opération de filetage n'est pas aussi simple. Même si elle ne sollicite pas de la part des opérateurs des efforts intellectuels importants (raisonnement, calcul mathématique, etc.), c'est une opération assez stressante. Le travail en chaîne de produits de haute gamme nécessite en effet une concentration maximale des opérateurs, qui n'ont pas le droit à l'erreur (*qualité de la trace, quantité de produits, durée de réalisation, etc.*). D'ailleurs, la très bonne qualité des produits qu'ils réalisent est reconnue et récompensée par des prix qui varient, par exemple, du 4000 à 5000 euros pour un sac à main.

Cependant, *d'un point de vue physique*, cette opération semble très complexe, car elle impose aux opérateurs de travailler dans des *postures pénibles*, *d'effectuer des gestes répétitifs* et *de réaliser des efforts importants.* Ces sont les conclusions issues de ***la première observation et analyse de l'opération de filetage,*** réalisée par l'ensemble de participants au groupe GT- LMS, avec le concours de plusieurs opérateurs.

Considérée ainsi "à risque", l'opération de filetage a été confiée, par la suite, à l'équipe de recherche SeT-ERCOS pour mener une étude approfondie, élargie par la suite au travail de conception. Plus précisément, ce partenaire a eu pour **mission initiale** *d'objectiver les risques que l'opération de filetage* semblait avoir pour *le confort, la santé, la sécurité et l'efficacité des opérateurs*. Cependant, cette première **mission de "vérification"** a évolué vers **une mission de "création"**et **"de conception"** car le souhait de l'entreprise était de faire évoluer les situations de travail.

III.2 Organisation des essais

Nous présentons ainsi de manière détaillée la démarche d'intervention mise en place par l'équipe SeT-ERCOS au sein du groupe GT - LMS. Il s'agit d'une participation "individuelle", mais en même temps collective, car les autres partenaires du groupe de travail (l'entreprise LMS et la CRAM de Franche-Comté) ont suivi de près l'évolution de cette étude, étant informés et consultés à travers plusieurs réunions et présentations bimensuelles.

La préférence pour l'équipe SeT-ERCOS s'explique notamment par l'expérience détenue et la richesse des moyens et des outils de conception ergonomique à sa disposition.

III.2.1 Organisation de l'intervention de l'équipe SeT-ERCOS

Il convient d'abord de mentionner pour cette étude la constitution du **groupe GT-ERCOS**, groupe composé *d'un ergonome - concepteur (moi-même)*, *d'un ingénieur et d'un technicien.*
Les *principales contraintes* posées par l'entreprise pour cette intervention ont été *les coûts et les délais* de réalisation de 3 mois (novembre - janvier).

L'objectif précis de l'étude

Le but de cette étude a été, comme déjà évoqué, dans un premier temps *d'objectiver les risques d'apparition de TMS sur le système de travail existant correspondant à l'activité de filetage*, risques identifiés auparavant par les partenaires CRAM et ERGOS du groupe GT – LMS (figure III.5).

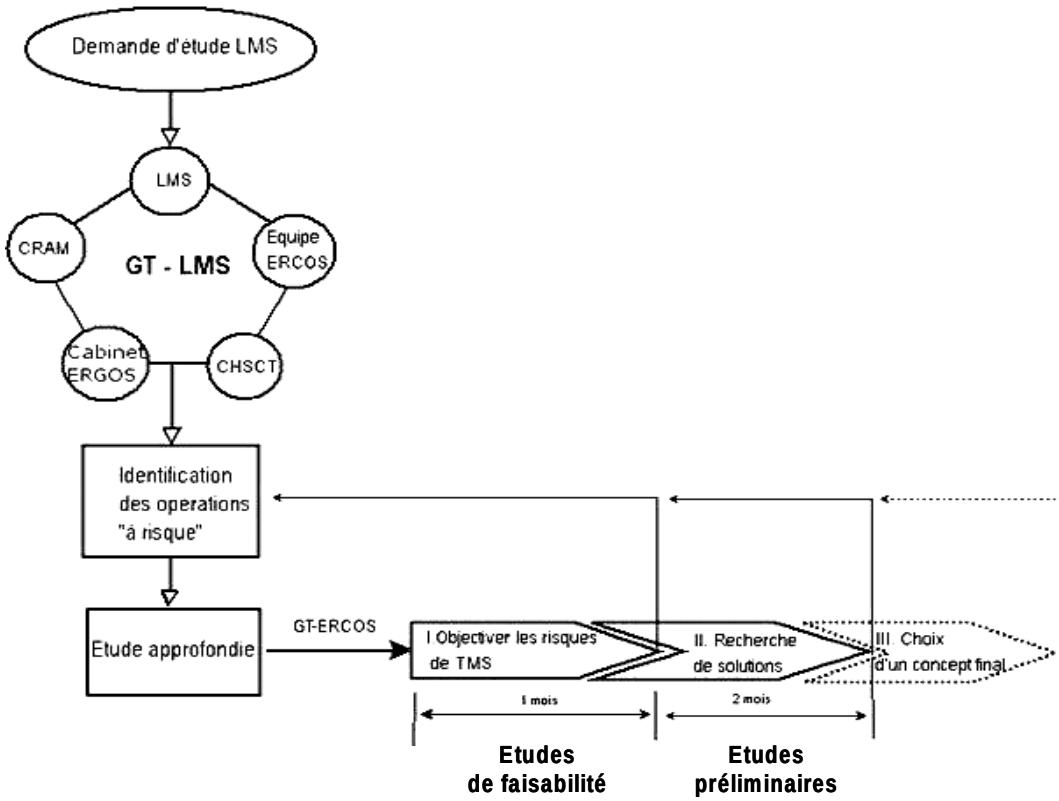


Fig. III.5 Les phases de l'intervention du groupe GT-ERCOS

Nous précisons qu'il s'agissait notamment de **facteurs de risques "biomécaniques"** qui découlent surtout de la mauvaise conception du système de travail.
A travers cette première phase (figure III.5) qui correspond à la phase d'Etudes de Faisabilité de la méthodologie de conception anthropocentrée proposée (figure II.1), le groupe GT-ERCOS s'est proposé, en effet, **de "quantifier" la pénibilité gestuelle et posturale et les efforts des opérateurs "selliers-maroquiniers".** Cette évaluation devrait ainsi fournir ***plusieurs informations et recommandations pour la re-conception du système de travail*** *associé à l'activité de filetage*.
En raison de leur richesse en informations, ***les gestes et les postures des opérateurs*** sont en effet de ***"réels supports" pour la conception.***

Ainsi, à l'appui de ces premières évaluations, le groupe GT-ERCOS a eu pour mission, dans un deuxième temps, *de rechercher et de proposer de solutions d'amélioration des conditions de travail, donc de re-concevoir le poste/système de filetage*, identifié "à risque".
Cette deuxième phase (figure III.5) correspond en effet à la phase d'Etudes Préliminaires de la méthodologie de conception anthropocentrée proposée (figure II.1).

Un plan d'action détaillé a été ainsi défini par le groupe GT–ERCOS en commun accord avec les autres partenaires du groupe de travail GT-LMS, indiquant de manière précise ***les objectifs, les phases et leurs sous - phases réparties dans le temps, les moyens et les outils associés ainsi que les résultats attendus*** pour chacune des phases.
Ainsi, les schémas illustrés par *les figures III.6 et III.7 présentent ce plan d'action* qui correspond *aux deux premières phases de la méthodologie de conception anthropocentrée* que nous avons proposée, méthodologie adaptée ainsi à l'outil de filetage et au poste de filetage, donc au système de travail qui les contient.
Nous mentionnons que la description de ces deux phases de conception a été réalisée en utilisant la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technique) [Lissandre,1990]. Il s'agit d'une méthode de représentation structurée qui a, à la base, une syntaxe et de principes graphiques assez simples. De ce fait, la méthode SADT trouve son application en plusieurs domaines relevant de la productique, la gestion, le génie logiciel, etc. Cela est ainsi utilisé pour l'analyse d'un produit/système et sa représentation graphique, la construction d'un nouveau system, la gestion de projet, etc.

Pour les mêmes raisons de simplicité et clarté, nous avons retenu le diagramme SADT pour décrire, selon les figures III.6 et III.7, les phases de l'étude *(les Actigrammes)*, les données initiales *(les Entrées)*, les contraintes imposés par l'étude *(les données de Control)*, les moyens et les méthodes employés (Mécanismes) et les résultats obtenus *(les Sorties).*

Les ressources affectées à cette étude

Il s'agit des *ressources humaines*, dont les différents membres du groupe GT-ERCOS déjà présentés, mais également des *ressources matérielles* mises à disposition pour cette étude par l'équipe SeT-ERCOS.

Ainsi, selon les schémas présentés dans les figures III.6 et III.7, parmi les méthodes et outils prévus pour l'étude LMS, nous citons :

- *la centrale CAPTIV de mesure et d'observation* [FMA],
- *un banc d'observation vidéographique*,
- *le logiciel Actogram KRONOS - outil de dépouillement et d'analyse statistique de l'activité de travail enregistrée* [Kergelen,1986],
- *la méthode ergonomique RULA d'évaluation posturale* [MC Atamney,1993],
- *des outils de modélisation XAO* (Catia V5 R10, Pro Engineer),
- *le mannequin numérique MANERCOS* [Gomes,1999],
- *le logiciel 3D Studio Max* [Kinetix,2000].

Les résultats attendus

Le groupe GT-ERCOS a eu pour mission de fournir dans un premier temps des *indicateurs concernant les facteurs de risque des TMS*, notamment biomécaniques, qui découlent comme déjà évoqué de la conception du système de travail analysé. Parmi ces indicateurs, on peut citer les ***valeurs des angles articulaires*** correspondant aux postures des opérateurs pendant la réalisation du filetage et/ou les ***valeurs des efforts*** imposés par cette tâche, des ***cadences***, etc.

Dans un second temps, les résultats attendus par le groupe GT-LMS de la part du groupe GT-ERCOS devraient se présenter sous forme de ***modèles numériques de préconcepts proposés*** pour le futur système de travail associé à l'opération de filetage, modèles intégrant les caractéristiques physiques humaines des opérateurs.

Il est important de préciser que les résultats ciblés par nous-même étaient non seulement liés aux futurs systèmes de travail proposés pour l'entreprise LMS, mais surtout à la manière de les proposer, en utilisant la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée (figure II.1).

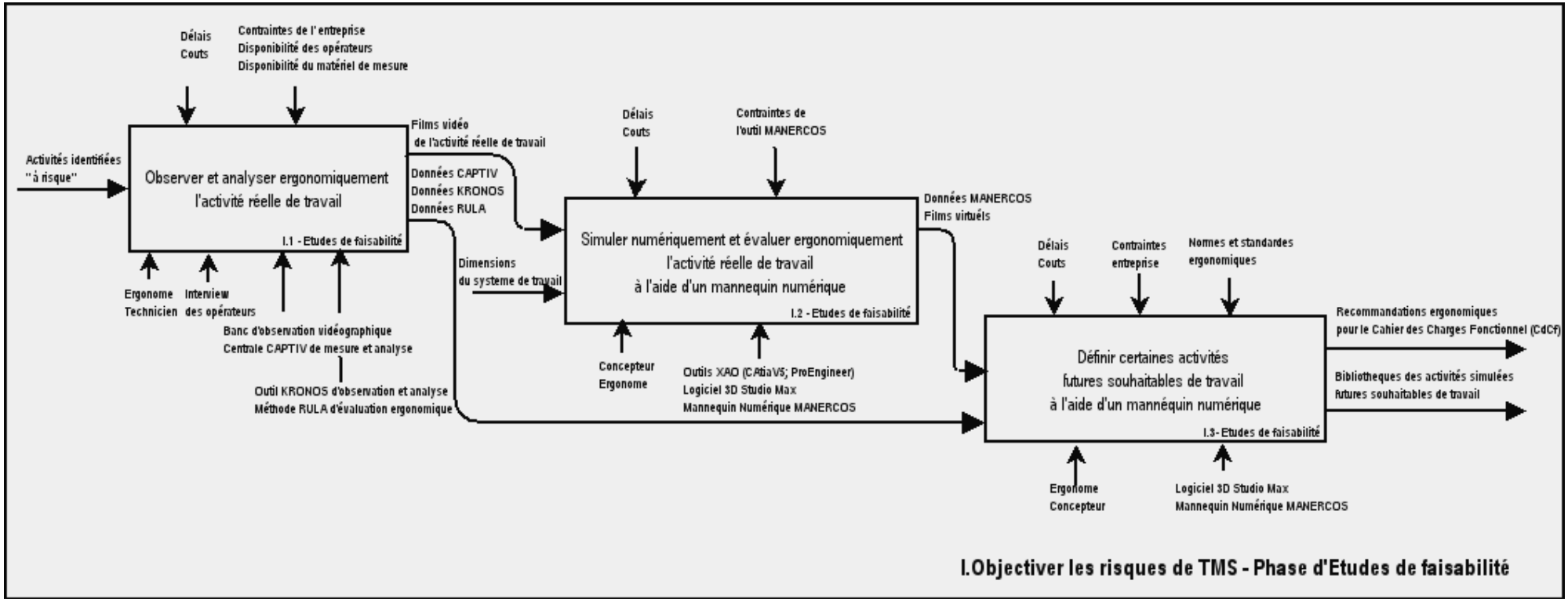


Figure III.6 Description de la première phase de l'intervention GT-ERCOS

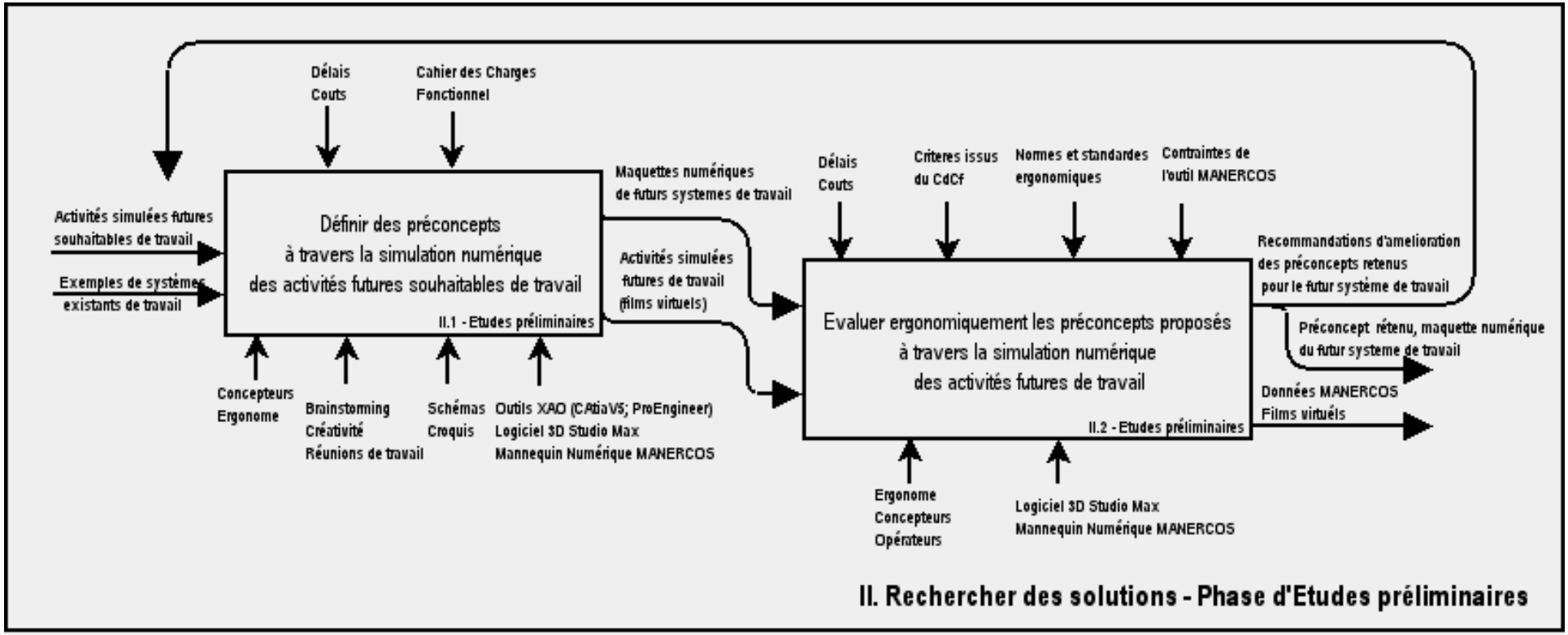


Figure III.7 Description de la deuxième phase de l'intervention GT-ERCOS

III.2.2 Objectifs et déroulement des expérimentations

Après avoir présenté l'organisation de l'étude, nous allons présenter, suivant les schémas illustrés par les figures III.6 et III.7, le déroulement effectif de chacune des phases envisagées par le groupe GT-ERCOS pour cette intervention à laquelle nous avons participé, comme déjà évoqué, en tant qu'ergonome-concepteur.

III.2.2.1 Objectiver les risques de TMS pendant la Phase 1(Etudes de faisabilité)

Cette phase a été très importante car elle nous a permis de *mieux comprendre l'activité de filetage et d'identifier et quantifier* les vrais problèmes qu'elle posait aux opérateurs selliers-maroquiniers. Compte tenu de nos objectifs de recherche définis auparavant, nous nous sommes intéressés uniquement à *l'aspect physique de l'activité des opérateurs* et en particulier aux *contraintes biomécaniques* que cela semblait imposer à ces derniers.
Nous allons ainsi montrer la manière dont cette phase s'est déroulée suivant le plan d'action illustré par la figure III.6.

III.2.2.1.1 Observer et analyser ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR) de filetage

Choix du panel d'opérateurs

Une campagne d'observation a été réalisée dans un premier temps avec le responsable de production de l'entreprise dans l'atelier de production (confection de sac à main), avec pour but d'identifier les différentes manières de filetage qu'ont les différents opérateurs. Cela nous a permis par la suite de choisir parmi eux trois opérateurs selliers maroquiniers, c'est-à-dire ceux qui sont les plus représentatifs pour l'entreprise et qui respectent la proportion générale de cette dernière.
C'est ainsi que la première étape a permis plusieurs observations et enregistrements de l'activité de filetage de trois des opérateurs (un homme et deux femmes) de différentes tailles et expériences professionnelles. Ainsi, la figure III.8 présente un tableau synthétisant les caractéristiques de ces opérateurs : ***âge, poids, stature, expérience***.

Sujets [Percentiles]	Age	Poids [Kg]	Stature [m]	Expérience [ans]
Homme 95	27	91	1,84	3
Femme 5	23	52	1,49	2
Femme 5	22	44	1,52	3

Figure III.8 Population ciblée

En effet, selon la Courbe de Gauss de répartition de la population selon la taille [Pheasant,1996], courbe illustrée dans la figure III.9, la population ciblée pour cette étude correspondait aux limites Minimales et Maximales (Femme petite – 5ème percentile et Homme grand – 95ème percentile).

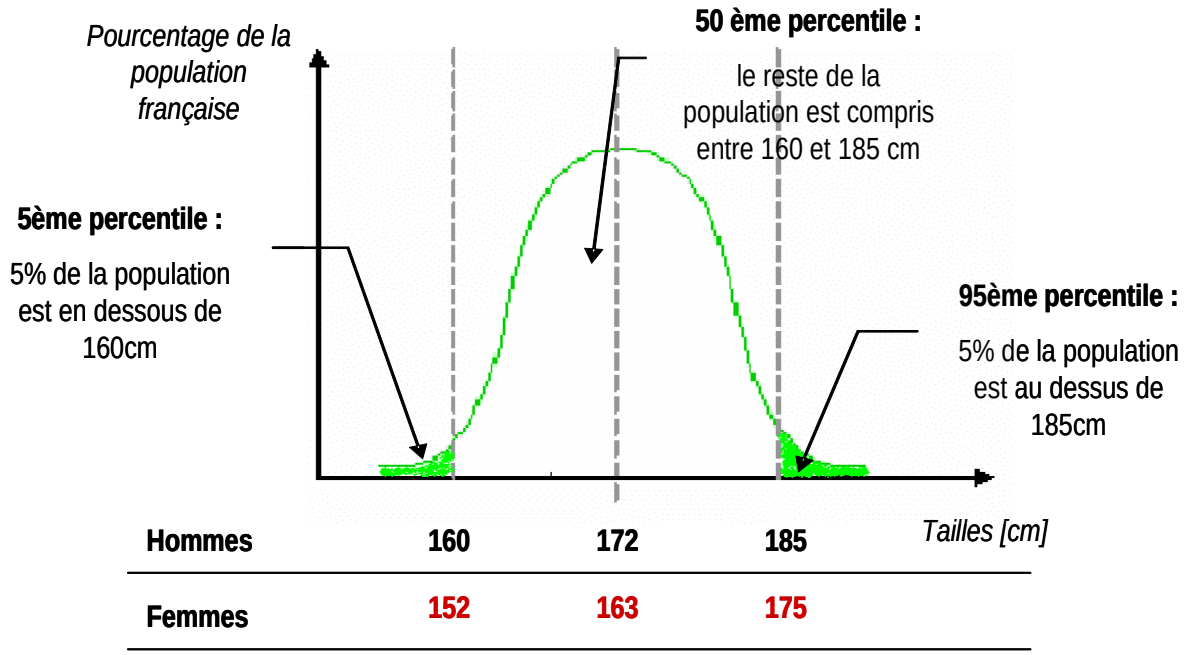

Pourcentage de la population française
50 ème percentile :
le reste de la population est compris entre 160 et 185 cm
5ème percentile :
5% de la population est en dessous de 160cm
95ème percentile :
5% de la population est au dessus de 185cm
Tailles [cm]
Hommes 160 172 185
Femmes 152 163 175

Figure III.9 Courbe de Gauss

Des interviews et la préparation des opérateurs

Après avoir choisi le panel d'opérateurs, nous avons organisé plusieurs discussions et interviews avec ceux-ci, sur la manière dont ils exécutent leur travail et les problèmes qu'ils rencontrent. Il a fallu ensuite les préparer pour la campagne de mesures qui prévoyait de les équiper de différents

capteurs disponibles avec la Centrale CAPTIV (Cf. Annexe A6) de mesure et d'observation et de les filmer pendant qu'ils exécutaient leur travail de filetage.

Campagnes de mesures. Outils et moyens de mesure

L'enregistrement de l'activité de filetage de chacun des opérateurs ciblés a été possible grâce au banc d'observation vidéographique que nous avons mis en place. Il s'agit de trois caméras, dont une appartenant à la centrale CAPTIV illustré, permettant l'enregistrement de plusieurs vues des interactions existant dans le système réel H-P-E, durant plusieurs séquences d'approximativement une minute (Cf. figure III.10).

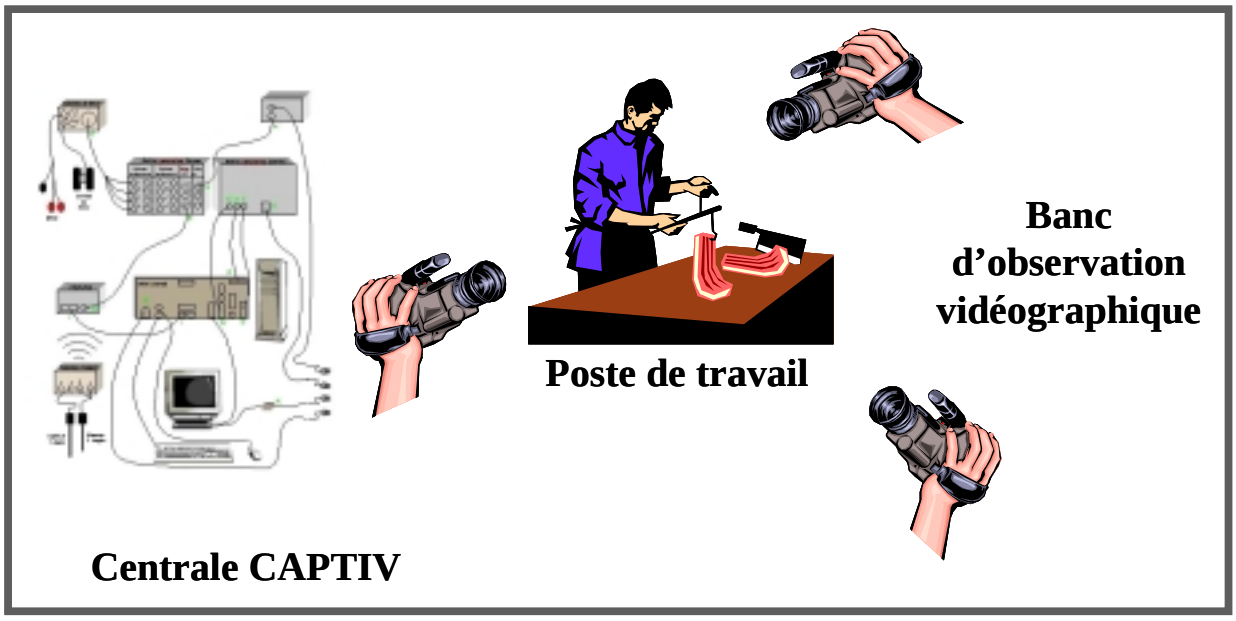


Figure III.10 Banc d'observation vidéographique

En ce qui concerne les mesures CAPTIV, nous avons équipé chacun des opérateurs ciblés avec :

- un capteur d'effort placé au niveau de l'avant-bras droit, le membre des opérateurs de l'entreprise le plus touché par les TMS;
- un capteur d'angles (goniomètre) placé au niveau du poignet droit;
- un capteur d'angles (goniomètre) placé au niveau du coude droit.

L'utilisation de ces trois capteurs a permis de connaître *la variation simultanée de l'effort au niveau des muscles du bras* et *les valeurs des angles périarticulaires*, correspondant aux gestes et postures de travail imposées aux opérateurs par l'outil et le poste de filetage, donc par le système de travail associé. La Centrale CAPTIV a facilité alors **les mesures des contraintes biomécaniques en lien avec l'outil et le poste de filetage**, favorisant ainsi l'identification des "défauts" de conception de ces derniers.

La figure III.11 présente la plate-forme de mesures mise en place à l'aide de la centrale CAPTIV pour le sujet Homme Grand - H95.

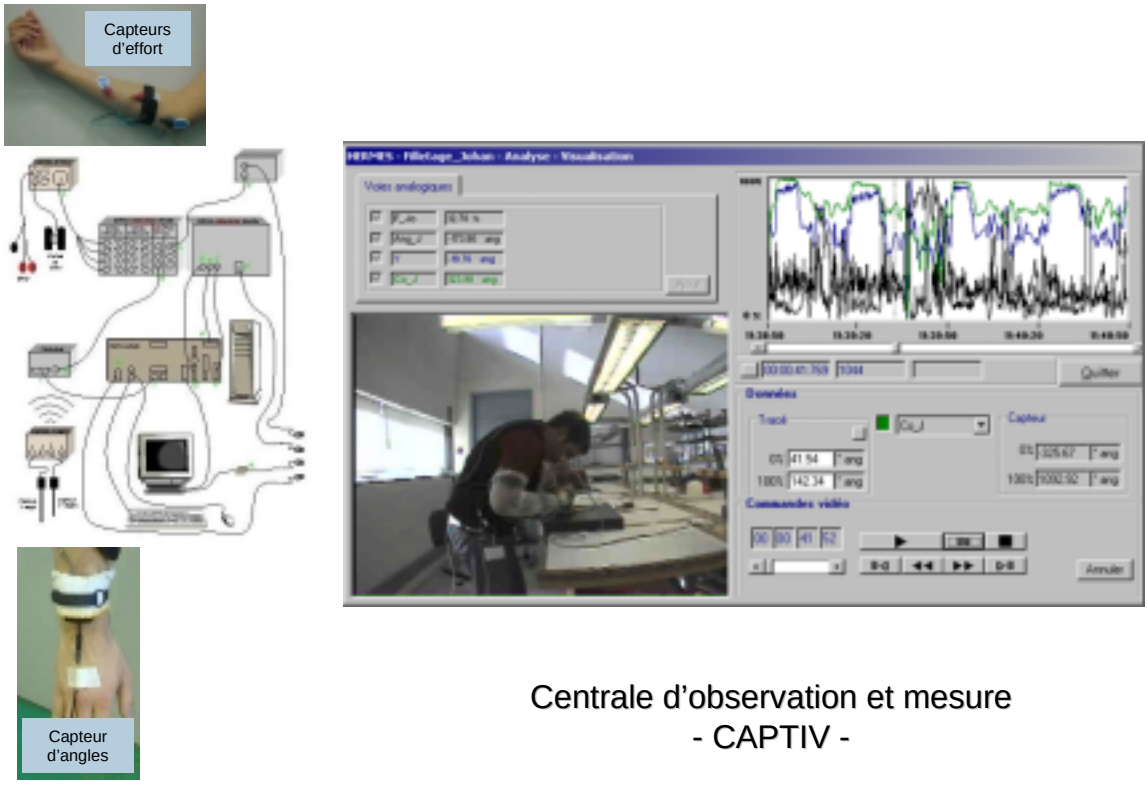


Figure III.11 Plate-forme de mesure CAPTIV. Evaluation de l'activité GP Réelle de filetage (sujet H95)

Ainsi, plusieurs campagnes d'observation et de mesure de l'activité de filetage de trois opérateurs ont été possibles à l'aide des outils et moyens évoqués.

Analyse des données mesurées

Après avoir réalisé toutes les mesures sur le terrain, notre groupe de travail GT-ERCOS a fait l'analyse approfondie des données acquises à l'aide de trois outils d'analyse: Actogram KRONOS, la méthode ergonomique RULA et le logiciel CAPTIV, outils présentés dans les annexes de ce document (Annexes A3, A4, A5, A6).

A. Analyse de l'activité à l'aide de l'outil Actogram KRONOS

A partir des films vidéographiques enregistrés (figure III.12), l'outil Actogram KRONOS a permis dans un premier temps d'analyser le travail en prenant en compte deux aspects: *la tâche effective de l'opérateur* et *l'activité posturale réelle* (figure III.13).

Figure III.12 Films vidéographiques enregistrés pour l'activité réelle de filetage (Sujet F5)

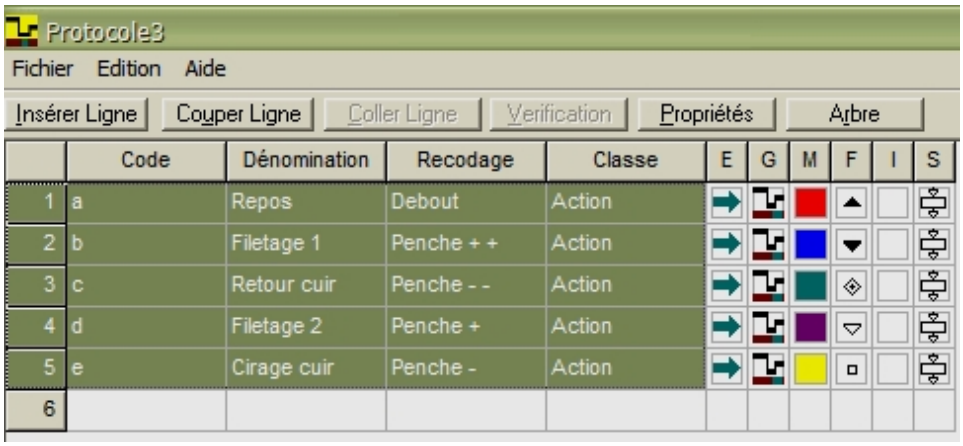
TACHE EFFECTIVE	ACTIVITE POSTURALE REELLE	
Repos	*Debout* *Buste Droit* *Bras baissés*	
Retour Cuir (Préparation)	*Debout* *Penché en avant "- - "*	
Cirage (Aller-Retour)	*Debout* *Penché en avant " –"*	
Filetage 1 (Aller)	*Debout* *Penché en avant "+ +"* *Tronc en rotation* *Bras levés*	
Filetage 2 (Retour)	*Debout* *Penché en avant "+"* *Tronc en rotation* *Bras levés*	

Figure III.13 Description de la séquence de travail de filetage

En s'inspirant des travaux de Rabardel [Rabardel,1998], deux types de postures ont été ainsi identifiées pour l'opération de filetage : la posture "*debout*" et *la posture "penché"*, cette dernière étant caractérisée

à l'aide d'une grille d'évaluation que nous avons proposée, grille qui considère que la posture la plus pénible est "penché ++" et la moins pénible "penché –".

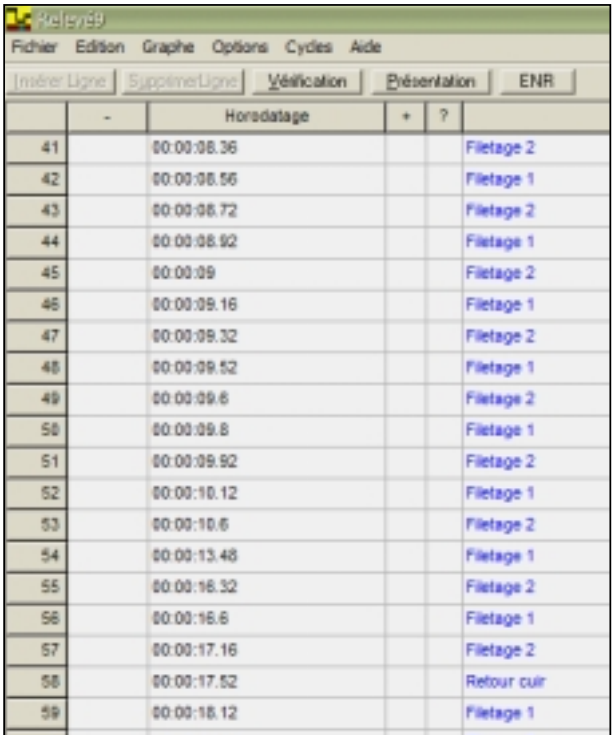
Compte tenu de ces postures, *un protocole d'observation* a été ainsi défini par notre groupe GT-ERCOS à l'aide de l'outil Actogram KRONOS et pour chacune des activités de filetage filmées (ex: figure III.14).



	Code	Dénomination	Recodage	Classe	E	G	M	F	I	S
1	a	Repos	Debout	Action						
2	b	Filetage 1	Penche + +	Action						
3	c	Retour cuir	Penche - -	Action						
4	d	Filetage 2	Penche +	Action						
5	e	Cirage cuir	Penche -	Action						
6										

Figure III.14 Protocole d'observation de l'activité réelle de filetage (Sujet H 95)

Les protocoles d'observation, avec *les observables définies (Repos, Filetage1, Retour cuir, Filetage 2, Cirage cuir) et les codes associés (a,b,c,d,e)*, ont servi ensuite au groupe d'analyse pour *le dépouillement de films des activités de filetage enregistrées*. Cette étape de dépouillement a eu pour résultat plusieurs relevés d'observation, dont un exemple représentatif est celui illustré en figure III.15.



	-	Horodatage	+	?	
41		00:00:08.36			Filetage 2
42		00:00:08.56			Filetage 1
43		00:00:08.72			Filetage 2
44		00:00:08.92			Filetage 1
45		00:00:09			Filetage 2
46		00:00:09.16			Filetage 1
47		00:00:09.32			Filetage 2
48		00:00:09.52			Filetage 1
49		00:00:09.6			Filetage 2
50		00:00:09.8			Filetage 1
51		00:00:09.92			Filetage 2
52		00:00:10.12			Filetage 1
53		00:00:10.6			Filetage 2
54		00:00:13.48			Filetage 1
55		00:00:16.32			Filetage 2
56		00:00:16.6			Filetage 1
57		00:00:17.16			Filetage 2
58		00:00:17.52			Retour cuir
59		00:00:18.12			Filetage 1

Figure III.15 Relevé d'observation de l'activité réelle de filetage (Sujet H95)

Ces derniers ont été exploités ensuite, toujours à l'aide de l'outil Actogram KRONOS qui est capable de fournir différents résultats statistiques. Parmi les analyses possibles nous avons retenu *la répartition des postures* sur l'activité totale de travail, illustrée par la figure III.16.

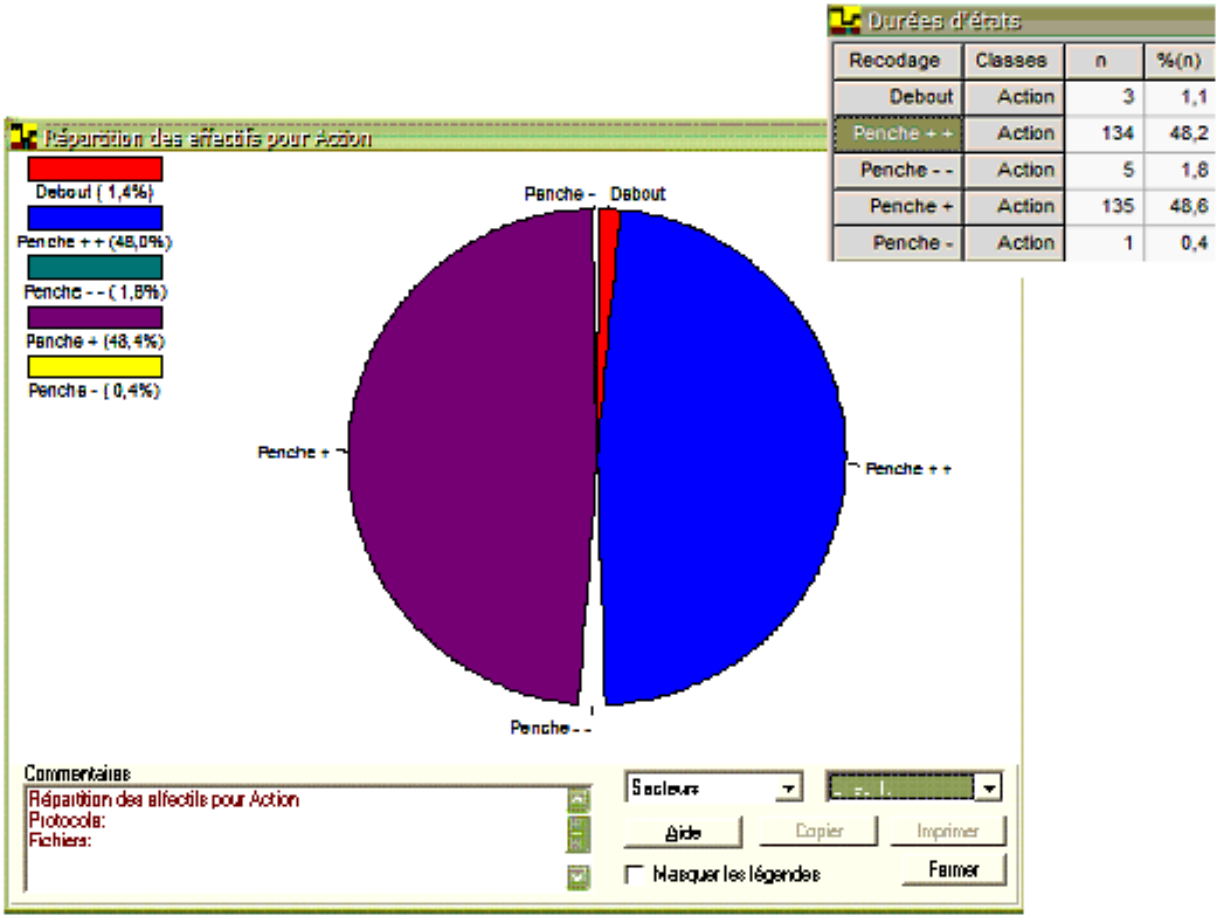


Figure III.16 Répartition des postures dans la durée totale de l'activité de filetage (Sujet H95)

A l'analyse de cette dernière répartition, nous avons observé, par exemple pour le sujet Homme 95, que ***les postures les plus pénibles (Penché ++, Penché +),*** *associées aux tâches effectives de filetage "aller-retour",* ***représentent approximativement 96,7 % de l'activité totale de filetage***. Cela signifie, selon le tableau illustré dans la figure III.17, que dans une très grande partie du temps alloué pour cette opération, l'opérateur se trouve dans **une mauvaise posture** *qui peut influer sur sa santé et son confort.*

Du fait que cette activité nécessite des **gestes répétitives** de filetage, en particulier ceux de *filetage "aller – retour",* nous avons cherché à connaître **la fréquence de ces mouvements**. Ainsi, la figure III.18, met en évidence, à travers l'exemple du chronogramme "tâche - posture" de l'opérateur Homme 95, des **fréquences élevées de 67,5 mouvements "aller-retour"/min**, l'équivalent de 1,125 mvt/sec.

Ces valeurs dépassent la limite de 30mvt/min de la fréquence présentée par la littérature [Monod, 2003] représentant ainsi une astreinte pour l'opérateur.

TACHE EFFECTIVE	ACTIVITE POSTURALE REELLE		Répartition dans la durée totale de l'activité [%]
Repos	*Debout* *Buste Droit* *Bras baissés*		**1.1**
Retour Cuir (Préparation)	*Debout* *Penché en avant "- - "*		**1.8**
Cirage (Aller-Retour)	*Debout* *Penché en avant " –"*		**0.4**
Filetage 1 (Aller)	*Debout* *Penché en avant "+ +"* *Tronc en rotation* *Bras levés*		**48.2**
Filetage 2 (Retour)	*Debout* *Penché en avant "+"* *Tronc en rotation* *Bras levés*		**48.5**

Figure III.17 Répartition Taches - Postures dans la durée totale de l'activité de filetage (Sujet H95)

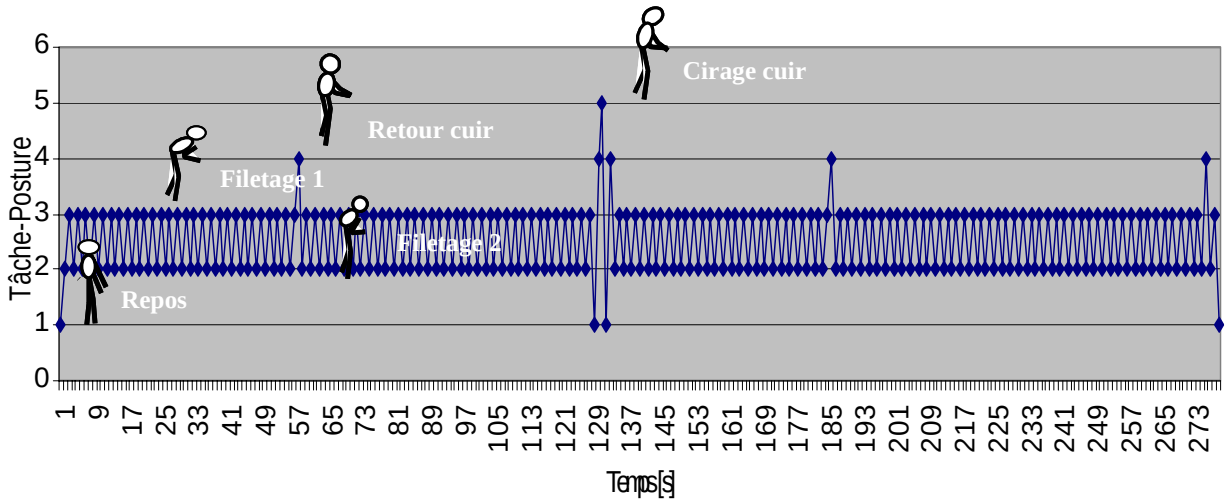


Figure III.18 Chronogramme "Tâche - Posture " (Sujet Homme 95)

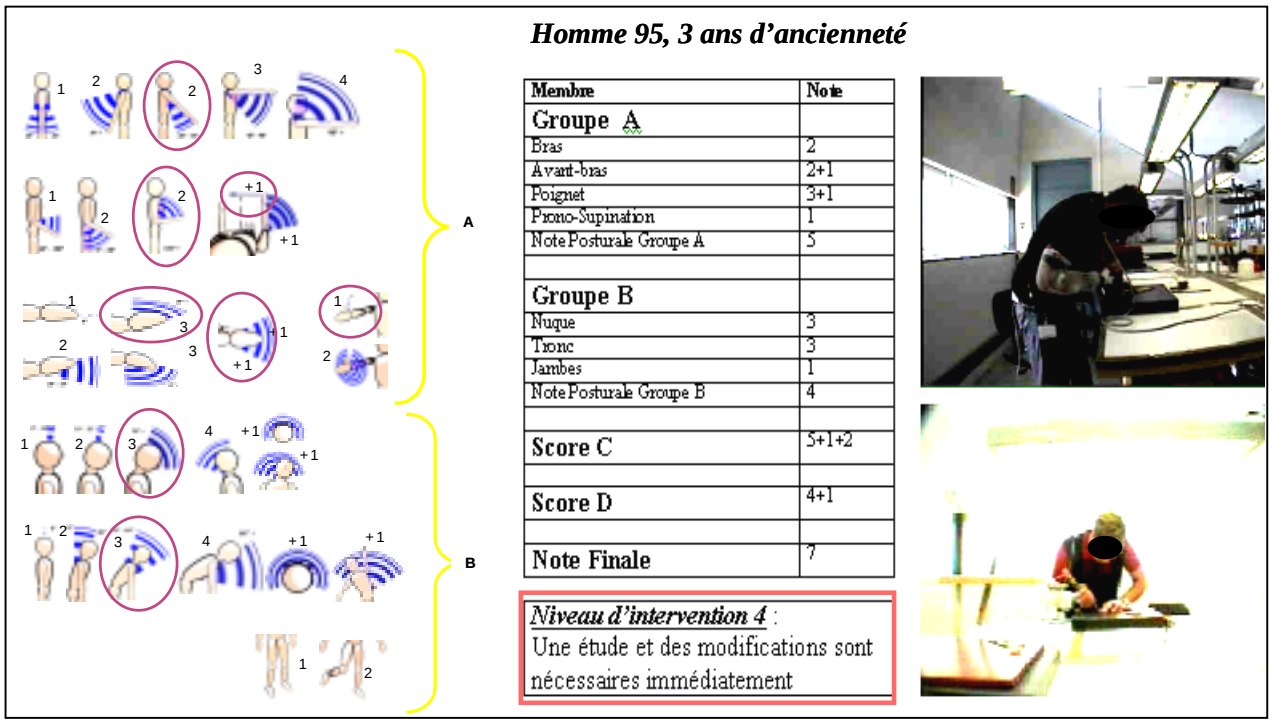
Ainsi, l'utilisation du logiciel Actogram KRONOS nous a permis d'identifier pour les opérateurs ciblés, ***la répartition de leurs postures dans l'activité totale de travail*** et de confirmer ensuite ***les fréquences élevées***, ***les gestes répétitifs de filetage*** qu'ils doivent faire.

B. Analyse posturale à l'aide de la méthode ergonomique RULA

A l'appui de ces résultats, nous avons ensuite utilisé ***la méthode ergonomique RULA***, en vue de mieux évaluer *les postures identifiées comme étant* ***les plus fréquentes*** *pendant l'opération de filetage*. Il s'agit en particulier d'évaluations réalisées *à partir des images de ces postures* et à l'aide de la *grille d'évaluation RULA.*

Ainsi, la figure III.19 met en évidence un exemple d'évaluation RULA pour le sujet Homme 95, **le score RULA de 7** pour la posture **"penché en avant + "** correspondant à la tâche de filetage **"retour".** Ce score indique ou mieux confirme, selon la méthode RULA, la nécessité ***d'une étude plus poussée de l'activité de filetage*** permettant *la proposition et la réalisation de modifications rapides du système de travail associé.*

Par l'analyse des scores partiels donnés par la grille RULA pour la posture de travail étudié, nous avons constaté que ceux-ci proviennent principalement de la *posture de l'avant-bras* et du *poignet droit* qui sont d'ailleurs les membres les plus sollicités pendant l'activité de filetage. A ceux-ci s'ajoute la mauvaise *posture du tronc*, donc "penché en avant", posture imposée à l'opérateur pour apporter une pression supplémentaire sur l'outil de filetage. Il y a également *l'inclinaison de la nuque* nécessaire pour une bonne vision et précision du travail de l'opérateur.



Homme 95, 3 ans d'ancienneté

Membre	Note
Groupe A	
Bras	2
Avant-bras	2+1
Poignet	3+1
Prono-Supination	1
Note Posturale Groupe A	5
Groupe B	
Nuque	3
Tronc	3
Jambes	1
Note Posturale Groupe B	4
Score C	5+1+2
Score D	4+1
Note Finale	7

Niveau d'intervention 4 :
Une étude et des modifications sont nécessaires immédiatement

Figure III.19 Evaluation posturale RULA de l'activité de filetage (Sujet Homme 95)

Les résultats présentés ici concernent surtout le sujet Homme 95, mais nous mentionnons que pour les deux autres sujets étudiés (Femme 5) les évaluations RULA donnent en général les mêmes scores que pour le sujet H95 (voir annexes A8).

Il est important de préciser que les résultats similaires obtenus pour les deux sujets Femmes, 5ème percentile retenus initialement pour l'étude, nous ont conduit à choisir par la suite *seulement la femme la plus petite (1.49 m).* En effet, l'étude de l'Homme de 95ème percentiles et de la Femme de 5ème percentile nous a permis de "parcourir" l'intervalle défini par les dimensions anthropométriques possibles de l'Humain.

Revenant à l'évaluation RULA de sujets retenus, nous indiquons que même si les scores sont similaires dans leur globalité, les façons de travailler de ceux-ci ne sont pas tout à fait identiques. Des différences apparaissent par exemple pour le sujet Femme 5ème percentile lors de l'utilisation d'une "estrade" lui permettant de se rapprocher davantage du plan de travail ou encore de l'emploi d'un *moule* qui fixe le cuir, etc.

La conclusion est donc la même pour les sujets pour lesquels les activités de travail on été étudiées à travers la méthode d'évaluation posturale RULA : ***nécessité d'une étude approfondie et modification rapide (re-conception) de l'outil de filetage et du poste de travail, dont du système de travail correspondant.***

Afin d'avoir une analyse encore plus précise de l'activité gestuelle et posturale de filetage des opérateurs retenus, nous avons utilisé le module d'analyse de l'outil CAPTIV, l'objet du paragraphe suivant.

C. Analyse posturale et d'effort à l'aide de l'outil CAPTIV

Le logiciel CAPTIV (Annexe A6) est le troisième outil employé par le groupe GT-ERCOS pour analyser les données recueillies sur le terrain. Il s'agit en particulier de l'analyse des ***valeurs des efforts*** fournis par les opérateurs au travail et des ***valeurs des angles articulaires au niveau du poignet et de l'avant bras.***

Si la méthode RULA nous a permis une évaluation posturale "globale" des opérateurs ciblés, l'outil CAPTIV a favorisé ***une analyse plus précise***, notamment en terme de gestuelle.
Par exemple, au niveau du poignet, l'analyse des mouvements a été possible simultanément dans deux plans, à travers les valeurs des angles de *"flexion/extension"* et *"abduction/adduction"* enregistrées à l'aide du goniomètre déjà évoqué.

Pour une meilleure compréhension, nous illustrons par la figure III.20 les mouvements possibles du

poignet, que nous définissons par suite.

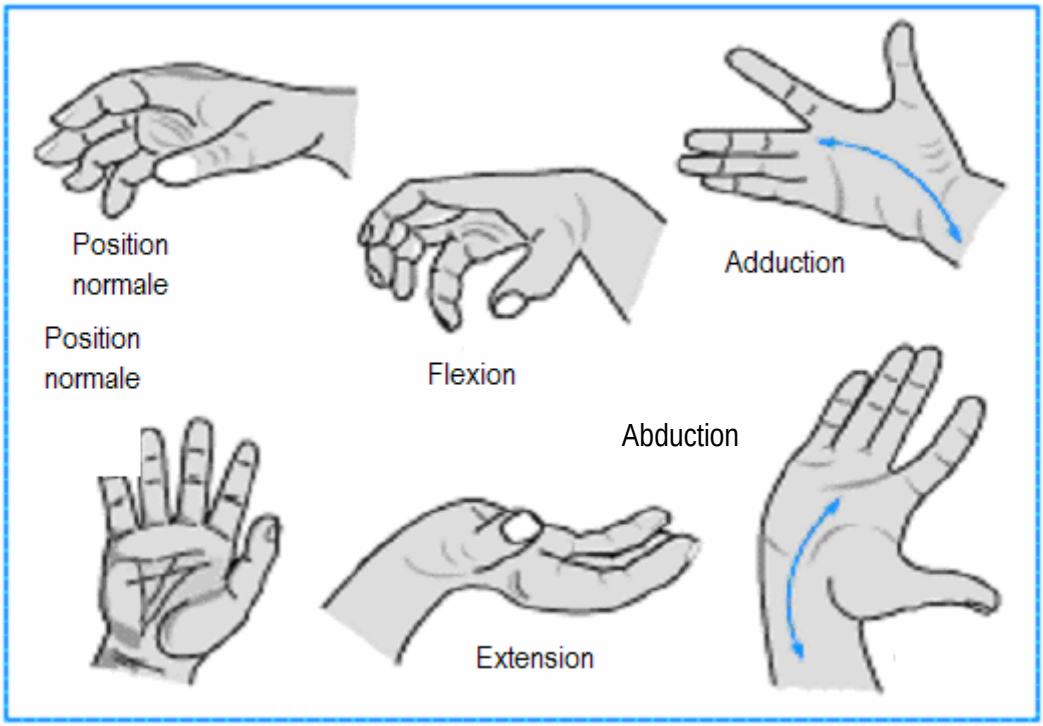


Figure III.20 Les mouvements possibles du poignet **[Source : Cail,2000]**

Ainsi, selon Cail [Cail,2000], **la flexion du poignet** est le mouvement de la main vers le bas, lorsque l'avant-bras est horizontal et que la paume de cette main est tournée vers le bas. **L'extension du poignet** est le mouvement de la main vers le haut, lorsque l'avant-bras est horizontal et que la paume de cette main est tournée vers le bas.
L'abduction du poignet est le mouvement qui écarte la main du plan sagittal médian et **l'adduction du poignet** est le mouvement opposé.

Revenant à l'analyse des mouvements du poignet, mais aussi du coude de sujets retenus, cela a été réalisable à l'aide de la centrale CAPTIV, et cela en continu pour toute l'activité de travail observée et enregistrée auparavant. La continuité de l'analyse est un autre avantage de cet outil, par rapport à la méthode RULA qui permet une évaluation discontinue, pour une posture bien choisie.
Ainsi, l'étude approfondie de l'activité de filetage de selliers maroquiniers a été possible grâce à l'analyse des différents couples **"tâche/posture – effort"**, **"tâche - angle"**, **"posture - angle"**, **"effort - angle",** etc.

Pour information, nous mentionnons que l'analyse ergonomique à travers l'outil CAPTIV est possible en temps réel, mais également après l'enregistrement (post-codage), variante que nous avons d'ailleurs choisie.

A titre d'exemple, la figure III.21 présente l'interface du logiciel CAPTIV correspondant à l'analyse de l'activité gestuelle et posturale du sujet H95.

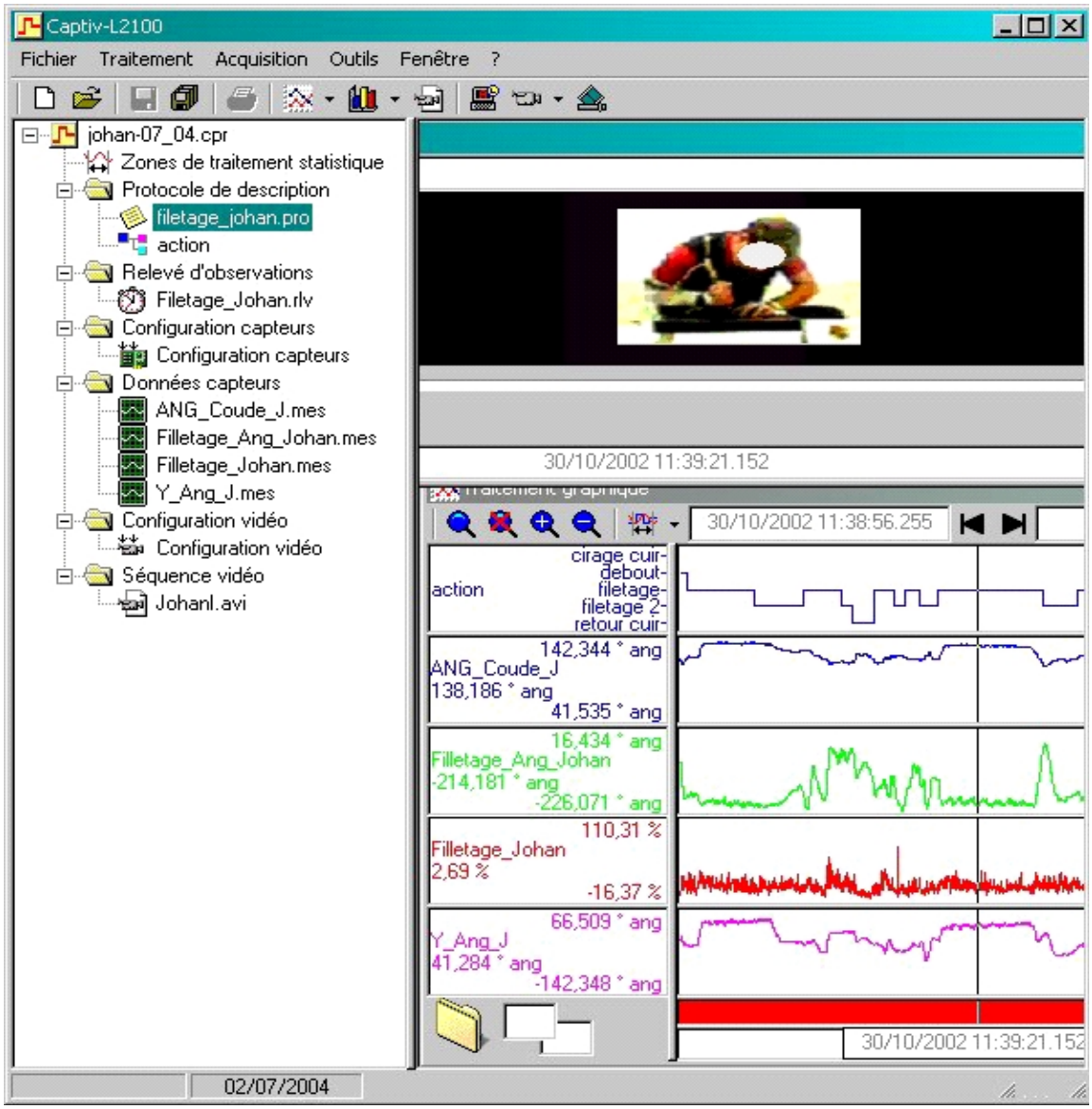


Figure III.21 Analyse simultanée "action – angles - effort" à l'aide de CAPTIV (sujet H95)

Nous pouvons ainsi distinguer deux parties :

- une qui contient *les fichiers de configuration* (capteurs et vidéo), *les fichiers de données acquises* (film vidéographique et données capteurs) et *les fichiers d'analyse de l'activité* (protocole de description, relevé d'observation) ;
- une partie qui permet de visualiser, de manière simultanée, *la variation des données acquises* (film vidéographique, données capteurs).

A l'aide de cette interface il a été facile pour nous d'identifier les valeurs des angles articulaires (poignet droit, coude droit) et de l'effort fourni par le sujet H95 à un moment donné, pendant qu'il exécutait la

tâche de "Filetage 1 – sens Aller". Ces valeurs ont permis de mieux caractériser la posture associée à cette tâche, respectif "penché + +", posture identifiée, à l'aide de l'outil Actogram KRONOS, comme répétitive et de longue durée (48.2% de la durée de l'opération de filetage).

Ainsi, selon la figure III.21, les valeurs identifiées pour l*es angles de flexion de l'avant-bras* (138°), *d'abduction du poignet* (-214°) et *d'extension du poignet* (41°), étaient en dehors de l'intervalle de confort postural établi par la littérature [Monod,2003], confirmant la posture pénible de l'opérateur H95.

Il est important de mentionner que les valeurs enregistrées à l'aide des capteurs d'effort, donc des électrodes placées au niveau de l'avant-bras de chaque opérateur étudié, ont été représentées en pourcentage de la valeur de la **Force Maximale Volontaire (FMV)** [Monod,2003].

Selon la littérature, la **Force Maximale Volontaire (FMV)** d'un muscle est définie comme *la force développée par ce muscle lors d'une contraction maintenue pendant 5 à 10 secondes.*

Sur la base de cette définition et à l'aide d'un capteur de force disponible avec la centrale CAPTIV, nous avons identifié la FMV pour chacun des sujets ciblés. C'est ainsi que l'acquisition des valeurs d'efforts a été possible par la suite résultant des valeurs d'effort exprimées en pourcentages de FMV.

Pour analyser ces valeurs d'efforts enregistrés nous avons tenu compte de la littérature qui affirme que les efforts qui ne dépassent pas 15 à 20% de la FMV peuvent être maintenus longtemps sans risques pour la santé [Monod,2004].

Pour exemplifier, selon la figure III.21, *l'effort fourni par l'opérateur à un moment donné était de 2.69 % de sa Force Maximale Volontaire, donc une valeur située dans l'intervalle de confort.*

La figure III.22 illustre ainsi la répartition en temps de l'effort, donc du pourcentage de la FMV, fourni par le sujet H95 pendant son activité de filetage et met en évidence ***les zones de confort et inconfort*** en rapport à celles définies par la littérature de spécialité [Monod,2004].

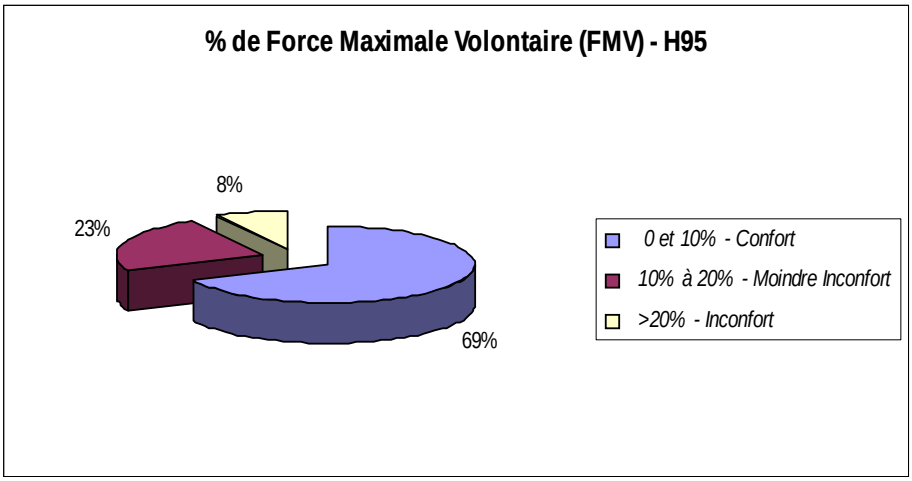


Figure III.22 Répartition du pourcentage de la FMV pendant l'activité de filetage (Sujet H95)

Il est apparu ainsi *que durant approximativement 69 % de l'activité*, l'effort fourni par cet opérateur se trouvait dans la *zone de confort*, car le pourcentage de la FMV était en dessous de 10 % (Figure III.23). Le reste de 31% du temps total de filetage l'effort était important, mais de courte durée.

En effet, l'évolution du % de FMV dans la durée totale de travail, illustrée par la figure III.23 a montré que l'opérateur H95 travaillait de manière assez régulière, les efforts au niveau des muscles de l'avant-bras ayant approximativement la même intensité.

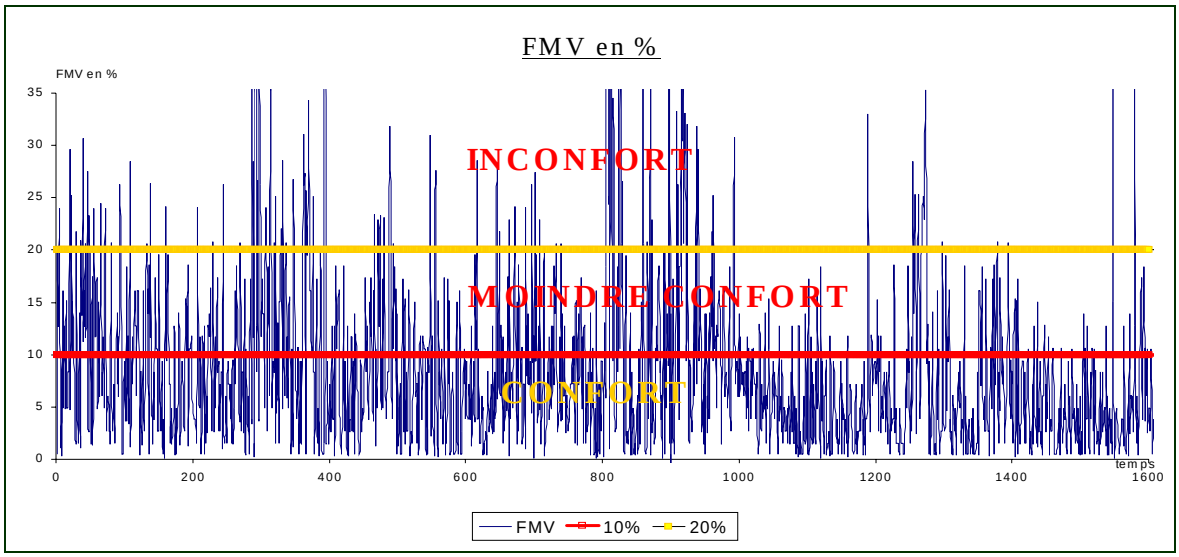


Figure III.23 Répartition du pourcentage de la FMV durant le temps total de filetage (Sujet H95)

Concernant l'autre sujet étudié (Femme5 avec expérience professionnelle de deux ans), il est apparu que *la majorité du temps de travail est réalisé avec des efforts se situant en dehors de l'intervalle de confort, les valeurs étant supérieures à 10% de la FMV.* Cela est illustré par la figure III.24 qui présente la variation et la répartition du pourcentage de la force maximale volontaire FMV enregistrée.

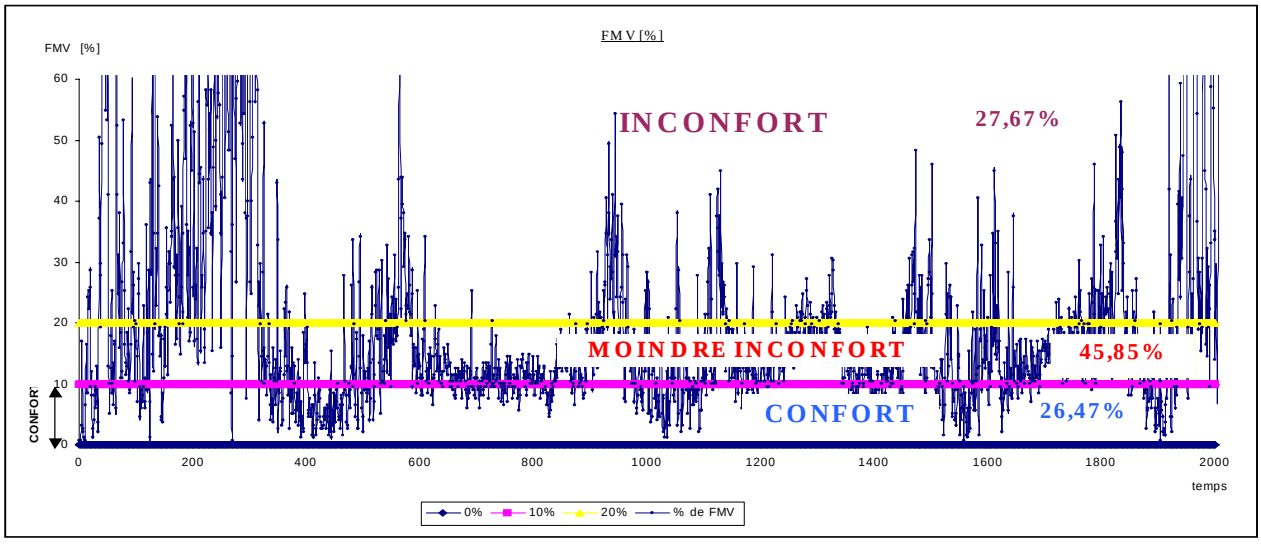


Figure III.24 L'évolution du pourcentage de la FMV durant le temps total de filetage (Sujet F5)

Il est visible ainsi *qu'approximativement durant trois quarts (plus de 73%) du temps consacré au filetage*, l'opératrice fournit *un effort très important*, supérieur à 10% de FMV. En effet, par l'analyse du graphique d'évolution du % de FMV, nous constatons que ***les efforts sont très élevés tout au début de l'activité*** et qu'ils diminuent au fur à mesure, cela correspondant à une tâche de "filetage de finition".Toutefois, les efforts restent en dehors de la zone du confort.

Les différences identifiées au niveau des efforts fournis par les opérateurs étudiés s'expliquent par les différences de taille de ceux-ci. Cependant ils ne sont pas tolérables et ils montrent qu'il s'agit d'un problème de conception de l'outil et du poste de filetage, qui ne sont pas adaptés à tout type d'opérateur.

Notre analyse a été réalisée sur une durée réduite de travail (séquence d'approximativement 1 minute), parce que les activités de filetage ne durent pas très longtemps. Cependant les opérateurs sont amenés à les effectuer plusieurs fois dans la journée. De ce fait, nous avons choisi, pour l'analyse, des périodes représentatives de leur activité de filetage.
Nous précisons cela car le temps de travail représente une composante très importante dans les analyses ergonomiques.

Revenons maintenant à *l'analyse de l'activité posturale* à l'aide de l'outil CAPTIV quand nous présentons, pour exemplifier, l'évolution dans le temps des *angles de "flexion/extension"* au niveau de l'avant bras du sujet H95 (figure III.25).

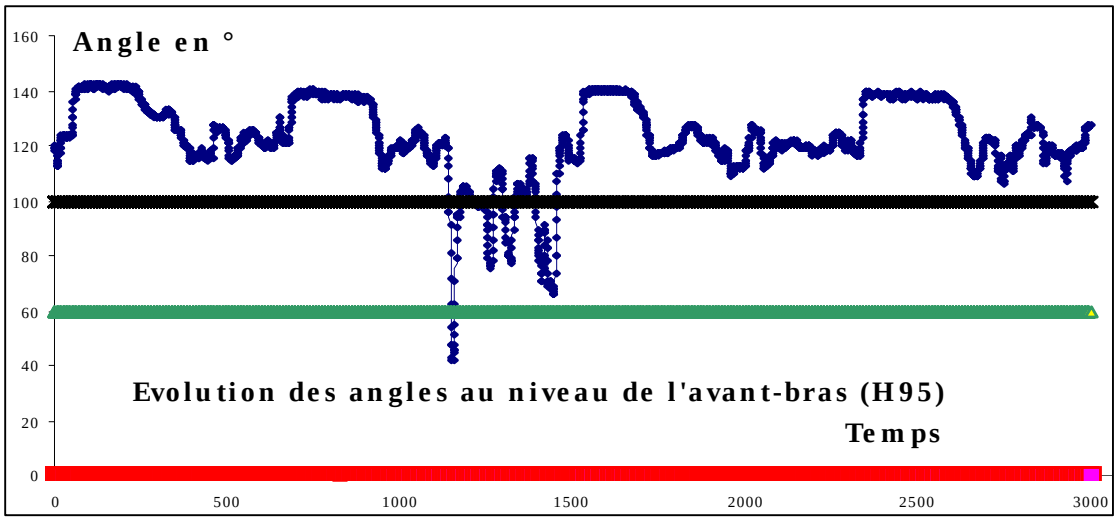


Figure III.25 Evolution des Angles de "flexion - extension" au niveau de l'avant-bras (Sujet H95)

A l'analyse de ce graphique, il est apparu que la plupart du temps, ***les angles de l'avant-bras***, en particulier ceux de flexion, *sont supérieurs à 100°* et donc très à l'extérieur de l'intervalle de confort, **la limite de confort pour la flexion étant de 60°** [Monod,2003]. Plus précisément, *99.6 % des valeurs des angles au niveau de l'avant-bras droit du sujet H95 sont en dehors du confort*, fait illustré par la figure III.26 qui présente la répartition des valeurs des angles en temps et par rapport aux valeurs de confort adoptées par la littérature [Monod,2004; Cail,2000],

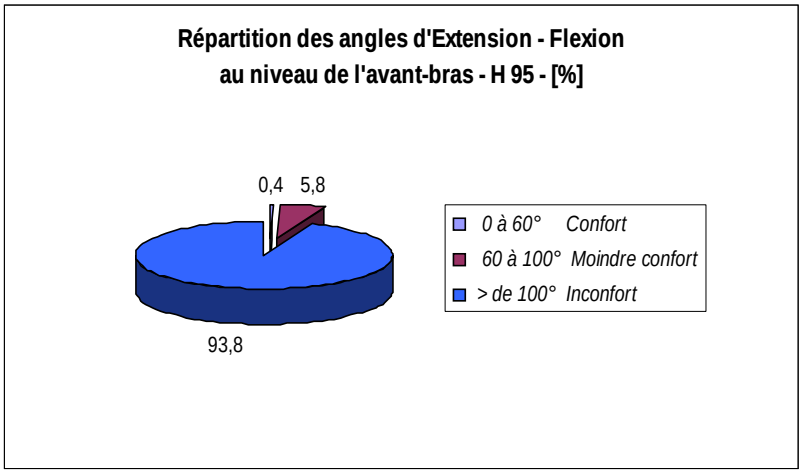


Figure III.26 Angles de flexion/extension au niveau de l'avant-bras (sujet H95)

En effet, pour fournir l'effort demandé par l'activité de filetage, l'opérateur H95 est obligé *de travailler penché* et *de plier son avant-bras de façon très importante*. Cela confirme d'ailleurs **les résultats obtenus à travers l'outil Actogram Kronos** et qui concernent la répartition des postures les plus pénibles (penché en avant "+" et "++"), mais également **les scores obtenus à l'aide de la méthode RULA**.

L'analyse des autres données enregistrées à l'aide des capteurs d'angles de la centrale CAPTIV est illustrée par les figures III.27 et III.28 qui présentent *la répartition des valeurs des angles au niveau du* ***poignet droit*** *du sujet H95 dans le temps total de travail enregistré*.

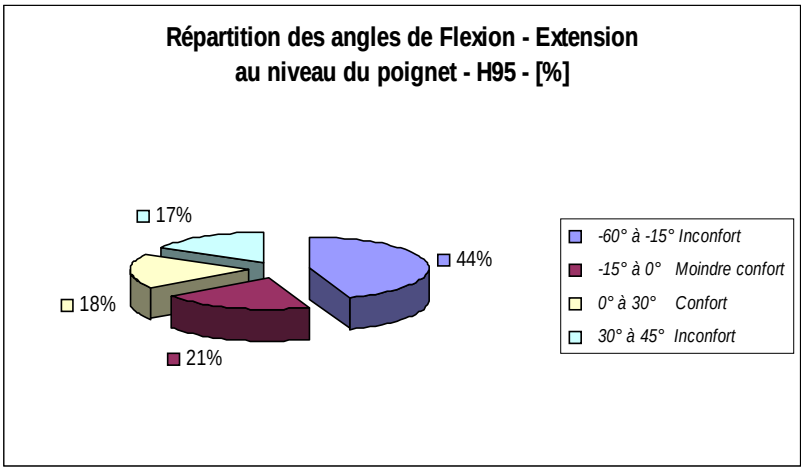


Figure III.27 Angles de "flexion/extension" au niveau du poignet (Sujet H95)

Nous constatons ainsi que le sujet H95 travaille avec le *poignet en flexion* (valeurs des angles négatives) pendant approximativement 65% du temps de travail et *le reste en extension* (valeurs des angles positives). De plus, ces valeurs sont dans l'intervalle de confort de seulement 18% du temps de travail.

De la même manière, le poignet droit de l'opérateur H95 travaille approximativement 93% du temps de l'activité *en adduction* (valeurs des angles négatives) et le reste en abduction (valeurs des angles positives).

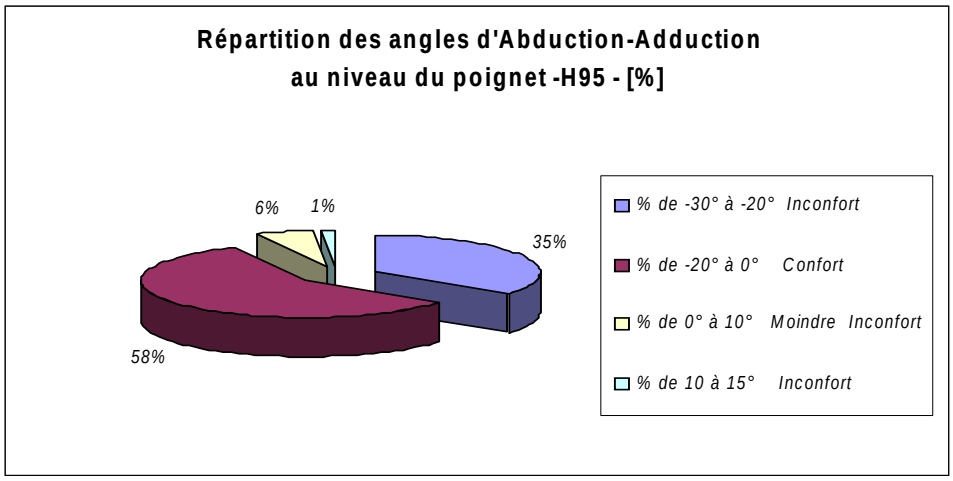

Répartition des angles d'Abduction-Adduction
au niveau du poignet -H95 - [%]
6%
1%
35%
58%
% de -30° à -20° Inconfort
% de -20° à 0° Confort
% de 0° à 10° Moindre Inconfort
% de 10 à 15° Inconfort

Figure III.28 Angles de "abduction/adduction" au niveau du poignet

Nous remarquons dans ce cas que, durant *58% du temps de l'activité, les angles d'adduction du poignet sont dans la zone de confort* et dépassent, le reste du temps, les limites de confort.

Ces résultats ont confirmé à nouveau que la posture du poignet est pénible dans un maximum de temps de travail et donc que c'est une posture "à risque" pour l'opérateur.

Pour l'autre sujet étudié (F5), les résultats sont en général similaires, conformes au tableau récapitulatif illustré par la figure III.29, les petites différences apparues provenant en effet des façons différentes de travail. Il convient de rappeler que l'étude a débuté par l'observation de plusieurs sujets selliers maroquiniers de différentes caractéristiques et il s'est concentré par la suite seulement sur deux sujets(Homme grande taille H95 et Femme petite taille F5), afin de "balayer" le panel initial des opérateurs.

Nous n'insistons pas plus sur ces aspects car la conclusion de cette étude est : **l'activité de filetage est "à risque"**. ***Les postures pénibles, les gestes répétitifs et les efforts très importants*** en lien étroit avec ***l'organisation du travail, la configuration et l'amenagement des postes de travail***, sont reconnus comme étant des *facteurs de risque d'apparition de maladies professionnelles, donc de TMS au sein de l'entreprise LMS.*

INDICATEURS DE FILETAGE			Sujet				Evaluation Globale
			H 95		F 5		
			Résultats	Note	Résultats	Note	
FMV [%]			*69 % confort* *31 % inconfort* *Obs: Grande Taille*	3 x ☹	*26 % confort* *74 % inconfort* *Obs: Petite Taille*	7 x ☹	
ANGLES	Poignet	Flx/Ext	***Flx:** 65 % inconfort* ***Ext: 17 %** inconfort* *18 % confort*	8 x ☹	***Flx:** 43 % inconfort* ***Ext:** 17 % inconfort* *40 % confort*	6 x ☹	
		Abd/Add	***Abd:** 7 % inconfort* ***Add:** 35 % inconfort* *58 % confort*	4 x ☹	***Abd:** 28 % inconfort* ***Add:** 36 % inconfort* *36 % confort*	6 x☹	
	Coude	Flx/Ext	*2 % confort* *98 % inconfort*	10 x ☹	*19 % confort* *71 % inconfort*	7 x ☹	

Figure III.29 Synthèse des analyses CAPTIV de l'activité de filetage (sujet H95 et F5)

Ces risques biomécaniques proviennent notamment de la ***mauvaise conception des outils et postes de travail, dont des systèmes de travail*** qu'il est indispensable de revoir.

Les résultats obtenus par notre groupe GT-ERCOS lors de *cette étape d'observation et analyse de l'activité de travail* ont permis au groupe de travail GT-LMS constitué au sein de l'entreprise *de définir plus clairement les directions suivantes de l'étude*. Celui-ci a considéré que **l'outil de filetage** et **le geste qui en découle** étaient les principales causes des problèmes posés par le poste de filetage. Cependant les modifications immédiates qui s'imposaient ne pouvaient pas remettre en cause la totalité de ce poste de travail (organisation de l'atelier, plan de travail,…).

En effet, il apparaît important de préciser que la proposition d'une simple modification du plan de travail de filetage (table), par exemple, devait entraîner la modification de tous les plans de travail de l'atelier de production. L'explication vient du fait que presque toutes les opérations se font sur le même type de plan de travail et que seuls les outils changent.

Ainsi, par la prise en compte des souhaits et des contraintes de l'entreprise LMS en terme de coûts et délais, le groupe de travail s'est dirigé en particulier vers **deux objectifs**:

- *étudier et modifier l'outil à main, donc "le fer à fileter", en vue d'une première amélioration de l'activité de filetage, tout* ***en conservant le geste métier, le caractère artisanal des produits;***
- *envisager l'automatisation "partielle" de l'activité de filetage par l'introduction d'une machine de pré-filetage, qui ne devait pas éliminer l'outil à main et le geste métier, mais le compléter. Cela devait permettre aux opérateurs de réaliser certaines des "tâches" de filetage dans de postures et gestes de moindre inconfort et sans efforts physiques importants.*

Il a fallu ensuite préparer le passage à la phase suivante qui était de proposer des solutions. Ainsi, le transfert des données recueillies lors de la phase d'observation "sur le terrain" dans la phase de recherche de solutions s'est déroulé selon le schéma illustré par la figure III.6 en deux étapes :

- *la simulation numérique et l'évaluation ergonomique de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle de travail à l'aide d'un mannequin numérique ;*
- *la définition des Activités Gestuelle et Posturale Futures Souhaitables de travail à l'aide d'un mannequin numérique.*

III.2.2.1.2 Simuler numériquement et évaluer ergonomiquement l'Activité Gestuelle et Posturale réelle (AGPR) de filetage

Lors de la phase précédente, l'analyse de l'Activité Gestuelle et Posturale existante, réalisée grâce à des outils et méthodes ergonomiques classiques, nous a permis d'identifier et d'objectiver les problèmes posés aux opérateurs par l'outil de filetage et le poste de travail associé à l'opération de filetage. Nous présentons ensuite la manière dont cela peut intervenir dans la proposition de solutions, notamment par l'intermédiaire du ***cahier des charges fonctionnel*** qui sera défini pour le nouvel outil de filetage. Ce dernier s'appuie alors sur ***deux types de données***: celles qui proviennent *des normes et standards (critères imposés)* et celles qui sont issues de *l'analyse de l'existant (critères réels*).

Comme la figure III.30 l'indique, l'analyse du **système réel H-P-E** correspondant au **système Opérateur - Outil de filetage - Environnement de travail** appartenant à l'entreprise LMS, fournit une série de critères et de recommandations pour le cahier des charges fonctionnel du futur outil de filetage. L'analyse de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle apporte ainsi la **composante ergonomique**

"objective" en complément de la **composante ergonomique normative.** Il s'agit donc d'une évolution du cahier des charges fonctionnel d'un caractère très "normatif", dicté donc par les normes, vers un caractère plus "réaliste", "commandé" par l'existant, le réel. Cette transformation doit se faire ressentir dans l'étape qui suit la validation du cahier des charges fonctionnel, qui est celle de recherche et proposition de solutions de pré-concepts. Par conséquence ces dernières doivent résoudre les problèmes soulevés par l'activité réelle de travail, tout en sauvegardant la qualité du travail, le métier,…

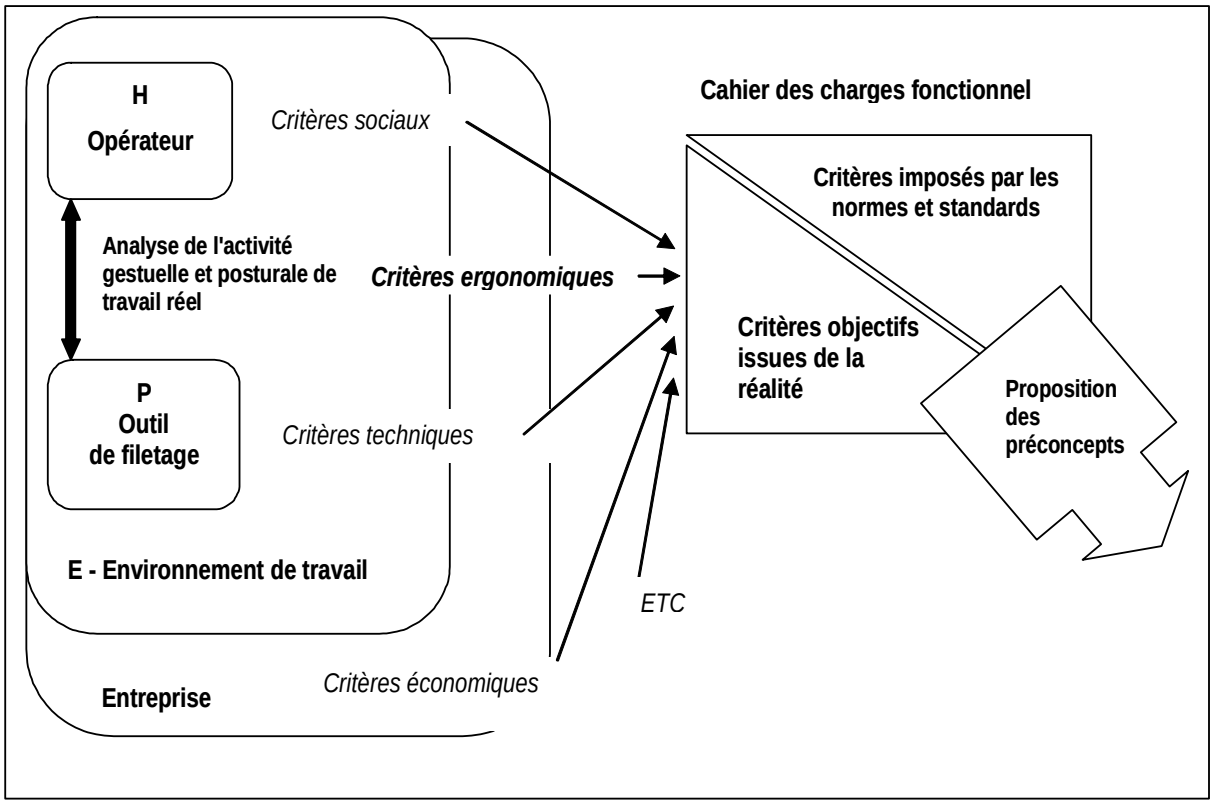


Figure III.30 Les composants du cahier des charges fonctionnel

Nous proposons ainsi la méthode de simulation numérique de l'activité réelle de travail réalisée, à l'aide de mannequins numériques, comme moyen qui permet "une convergence" entre les recommandations ergonomiques issues de l'activité réelle de travail et celles proposées par les normes ergonomiques.

A. Simulation numérique de l'activité réelle de travail

A l'appui de données issues de la première phase, nous avons simulé l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle de filetage des opérateurs ciblés, et cela grâce notamment au mannequin numérique MANERCOS et aux outils associés.

Selon la démarche mise en place pour l'utilisation de MANERCOS (figure II.11), dans un premier temps nous avons *modélisé numériquement le système Homme (Opérateur) – Produit industriel (Outil de*

filetage) – Environnement de travail pour chacun des opérateurs. A partir de leurs dimensions et formes réelles, nous avons modélisé le poste et les outils de filetage, à l'aide des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), dont CATIA et Pro Engineer. Comme la plupart des outils de CAO, ceux-ci sont compatibles en terme d'échange de fichiers avec le logiciel 3D Studio Max, le support logiciel de l'outil MANERCOS, qui a été utilisé ensuite pour la représentation Tri-Dimensionelle des opérateurs ciblés. Il s'agit de leur représentation sous forme de modèles anthropométriques respectant leurs dimensions réelles.

L'étape suivante a consisté à réaliser dans la *simulation effective de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR) de filetage* à partir des films vidéo enregistrés pour chacun de sujets (H95 et F5) et à l'appui de la décomposition de l'activité réalisée à l'aide de l'outil Actogram KRONOS déjà évoqué (figure III.31).

En effet, le Module d'Analyse de l'Activité de l'outil MANERCOS permet, comme déjà évoqué, le dépouillement d'un film vidéo et dans notre cas de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle du sujet enregistré. Pour cela, cette dernière est décomposée en comportements élémentaires (actions) par l'intermédiaire desquels est possible son transfert sur le mannequin numérique MANERCOS. A titre d'exemple, la figure III.31 illustre **les comportements élémentaires de l'activité de filetage exécutée par le sujet Homme 95** et le dépouillement associé. Il s'agit des tâches (ex. filetage, retour cuir, etc.) auxquelles nous avons associé des postures, que nous avons attribuées ensuite au mannequin numérique de taille correspondant au sujet étudié. Nous avons dépouillé par la suite les intervalles d'apparition (valeur Debut-Fin) de ces comportements élémentaires.

Il est important de mentionner que la définition des comportements élémentaires et le dépouillement sont des activités spécifiques à l'ergonome, ce dernier devant se familiariser avec l'interface de l'outil MANERCOS.

Manercos - Instances de comportements

Nombre d'images par secondes: 25

Numéro	Nom bibliothèque	Couleur	Nom comportement	Début	Fin
0	(0) (CompPieds)		(0) Debout	70	85
1	(0) (CompPieds)		(1) Filetage1	90	570
2	(0) (CompPieds)		(2) Retour cuir	574	850
3	(0) (CompPieds)		(3) Filetage 2	860	1255
4	(0) (CompPieds)		(4) Cirage cuir	1264	1519
5	(0) (CompPieds)		(1) Filetage1	1533	2115
6	(0) (CompPieds)		(2) Retour cuir	2120	2144
7	(0) (CompPieds)		(3) Filetage 2	2152	3099

Figure III. 31 Dépouillement de l'activité de filetage (sujet H95)

C'est le logiciel 3D Studio Max qui a permis ensuite une interpolation entre ces comportements élémentaires dépouillés, rendant ainsi possible la simulation numérique de l'activité GPR de travail dépouillée. Cette dernière avait pour objectif l'analyse de l'activité réelle et son utilisation ultérieure comme "support" pour la re-conception de l'outil et du poste de filetage.

Le résultat de la simulation obtenu apparaissait sous forme d'un fichier représentant la scène 3D du poste de filetage, respectant la modélisation numérique du système H-P-E (Opérateur – Outil - Environnement de travail) et l'animation des interactions existant entre les composants de celui-ci, comme le montre par ailleurs la figure III.32.

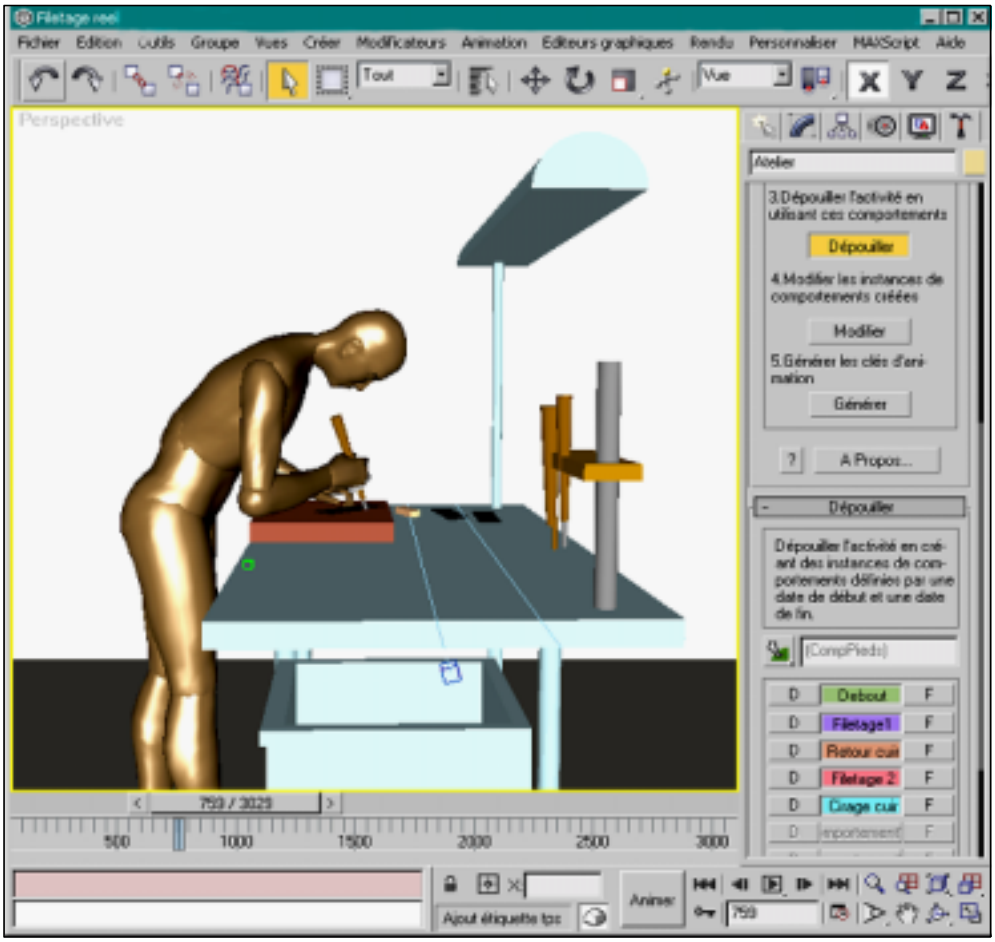


Figure III.32 Scène 3D de modélisation numérique du poste de filetage (H95)

Il s'agit ainsi de l'interface du logiciel 3D Studio Max, le support de l'outil MANERCOS, qui présente la simulation de l'activité de filetage et le dépouillement de l'activité réelle de filetage qui a été à son origine.

Il est important de préciser que, grâce au logiciel 3D Studio Max, les scènes 3D d'animation créées ont pu être converties ensuite en format .avi (films vidéo) ou format VRML (Virtual Reality Modelling Language), formats faciles à utiliser par tous les partenaires du groupe-projets.

A titre d'exemple, la figure III.33 met en évidence la procédure de simulation de l'activité de filetage (film réel et tableau de dépouillement) pour le sujet H95 et le résultat sous forme de film vidéo.

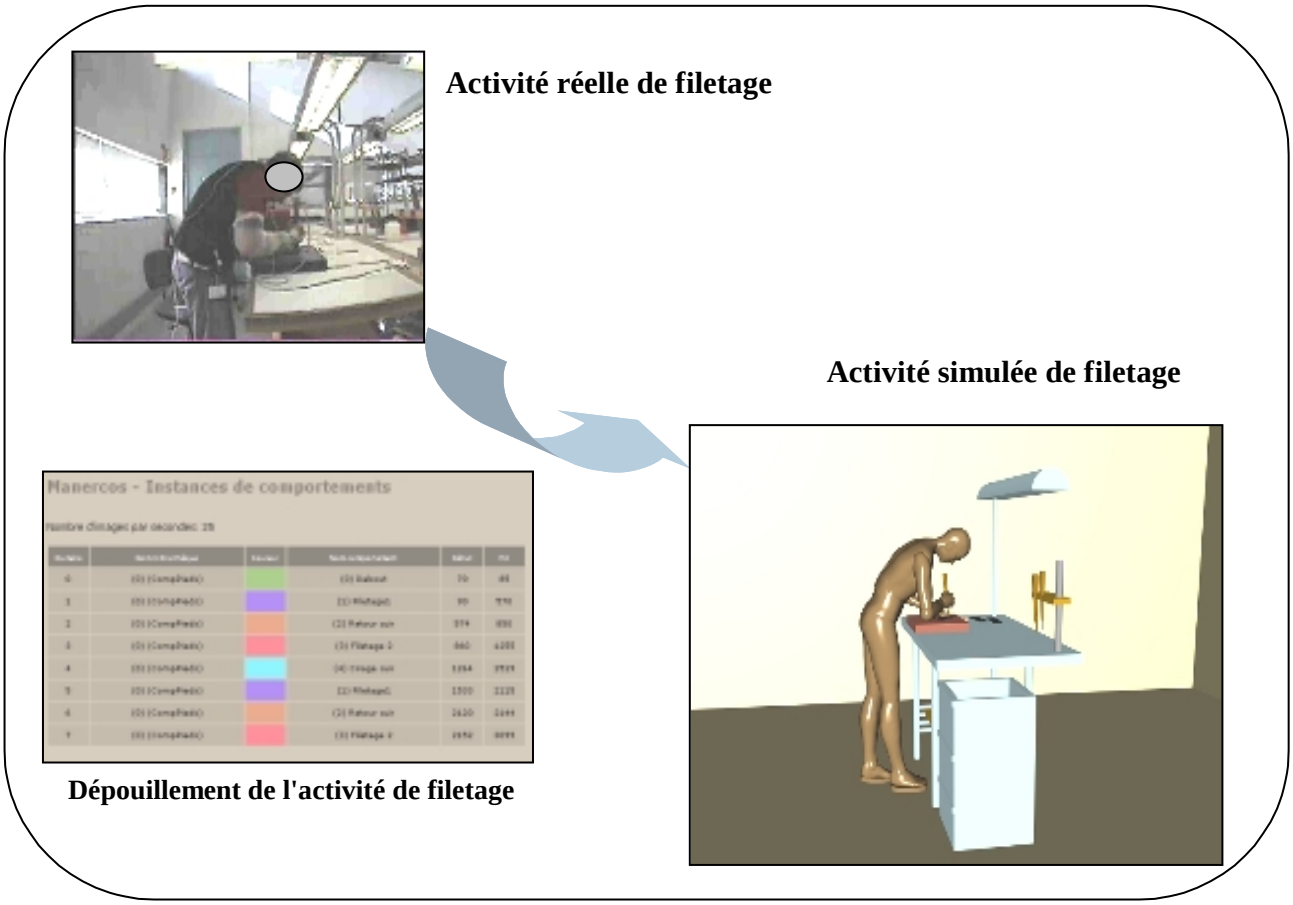

Activité réelle de filetage
Activité simulée de filetage
Manercos - Instances de comportements
Dépouillement de l'activité de filetage

Figure III.33 Simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Réelles de filetage à l'aide du mannequin numérique MANERCOS (sujet H95)

La même procédure a été utilisée pour les autres sujets étudiés. Compte tenu du fait que chacun des opérateurs travaille différemment, la décomposition de l'activité en comportements élémentaires a également été différente.
Ainsi, la figure III.34 met en évidence, à travers l'activité simulée, une autre façon de fileter qui est celle du sujet Femme 5 (2 ans d'expérience).

Ces films d'animation et les fichiers VRML (Virtual Reality Modelling Language) représentent en effet **de vrais moyens de communication et coopération pour les acteurs du groupe projet**. Le VRML est un format interactif, visualisable facilement à partir d'un navigateur Internet, permettant à l'observateur ou l'utilisateur de changer de point de perspective, d'effectuer des rotations, de visualiser des détails (zoom), etc. [Gomes,2004].

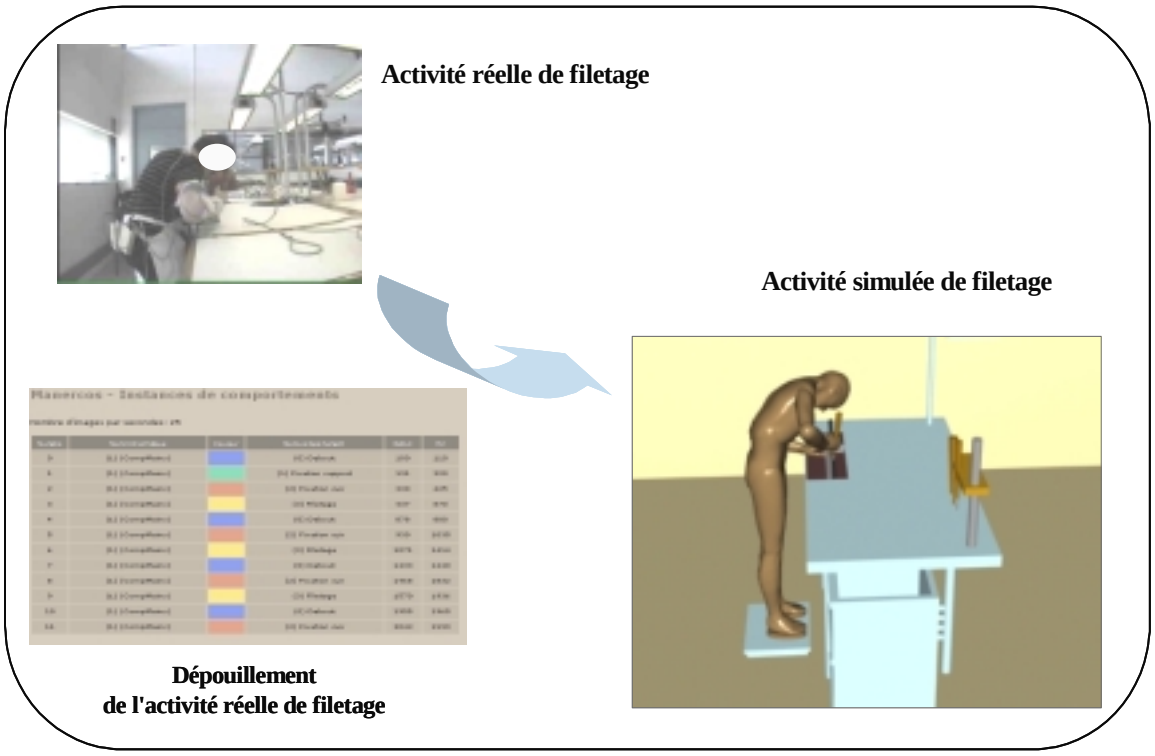


Figure III.34 Simulation virtuelle des Activités Gestuelle et Posturale Réelle de filetage à l'aide du mannequin numérique MANERCOS (sujet F5)

Ainsi, un exemple de fichier VRML représentant l'activité de filetage d'un des sujets étudiés est présenté dans la figure III.35.

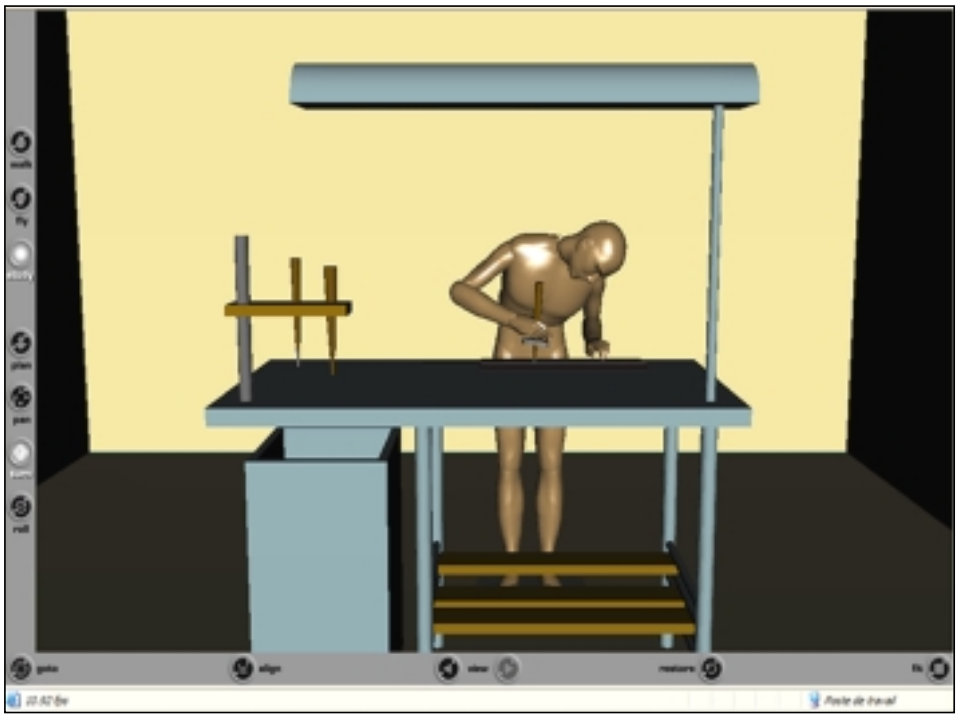


Figure III.35 Interface VRML représentant l'Activité Gestuelle et Posturale Simulée de filetage (sujet F5)

Nous insistons sur cet aspect car nous souhaitons *mettre en valeur les autres moyens et outils couplés au mannequin numérique MANERCOS et* qui sont **capables de fédérer en particulier les acteurs Ergonome et Concepteur du groupe projet.**
C'est d'ailleurs grâce à ces **outils "intermédiaires"** que le groupe GT-ERCOS, constitué de concepteurs et ergonomes, a réussi à réaliser cette étude.

Selon la démarche illustrée en figure II.11, l'étape suivante a consisté à réaliser une comparaison "réel - virtuel", des films des activités GP simulées à l'aide des outils MANERCOS et 3D Studio Max et des films des activités GP réelles enregistrées. Cette comparaison a été "subjective" car il n'existe pas de réels moyens de mesures. Cependant, l'écart constaté entre les deux activités ne semblant pas "significatif", nous avons décidé de continuer la démarche entreprise. Les activités GP pourraient être ***encore mieux simulées***, mais cela nécessite de faire évoluer le Module d'Analyse de l'Activité de l'outil MANERCOS, exigence que nous avons prise en compte dans la suite de nos recherches. Nous mentionnons que pour notre étude, la simulation des activités GP à l'aide de l'outil MANERCOS était suffisante pour montrer les problèmes posés aux opérateurs par l'outil et le poste de filetage.

Après avoir utilisé le mannequin numérique MANERCOS pour simuler les activités de filetage des sujets étudiés, le même outil nous a permis de les évaluer par l'intermédiaire de son troisième Module d'Evaluation Ergonomique ; cela fera l'objet du paragraphe suivant.

B. Evaluation ergonomique de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle Simulée

A travers les méthodes et normes ergonomiques intégrées au logiciel MANERCOS, nous avons évalué d'un point de vue ergonomique l'activité de travail simulée pour chacun des opérateurs étudiés. Le rôle de cette évaluation était de mieux comprendre l'activité de filetage réelle et ensuite de la faire évoluer et la faire "participer" au processus de re-conception du système de travail associé au filetage.

Evaluation posturale de l'activité de travail simulée à l'aide de la méthode RULA intégrée dans MANERCOS

La méthode d'évaluation RULA, adaptée et intégrée à l'outil MANERCOS, travail auquel nous avons participé, a été un des moyens utilisés pour l'analyse de l'Activité Gestuelle et Posturale Simulée de filetage. Cette évaluation a été possible directement à partir des scènes numériques des systèmes H-P-E de filetage, scènes obtenues à l'aide du mannequin numérique MANERCOS sous le logiciel 3D Studio Max.

La figure III.36 présente ainsi, à travers l'interface du troisième Module d'évaluation ergonomique de l'outil MANERCOS, un exemple d'évaluation RULA pour l'activité de filetage simulée du sujet H95.

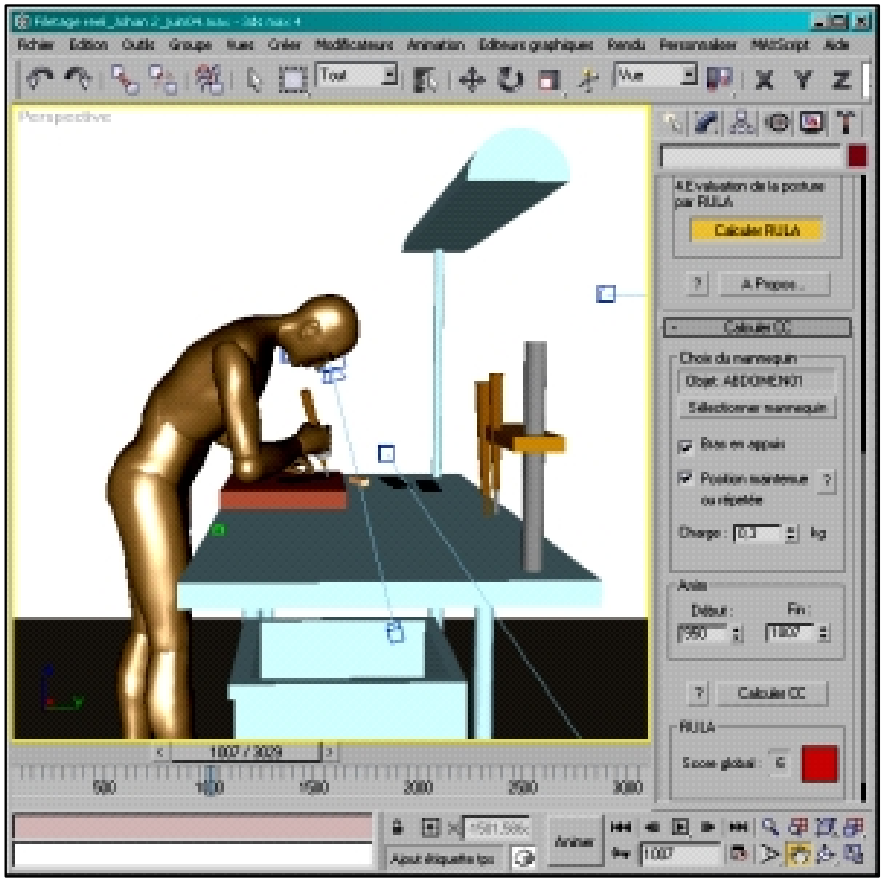


Figure III.36 Evaluation RULA sous MANERCOS de l'activité simulée de filetage (H95)

A ce stade de notre étude, l'outil RULA intégré sous MANERCOS permettait seulement *une évaluation "partielle"*, donc pour un moment bien choisi de l'animation de l'activité. Appliquée de cette manière à l'étude LMS, elle a confirmé les résultats obtenus lors de la phase précédente de l'analyse de l'activité réelle de filetage, quand des évaluations RULA ont été réalisées.

A titre d'exemple, la figure III.37 présente le score totale RULA (Cf. Annexe A5) obtenu lors de l'évaluation de l'Activité Gestuelle et Posturale Simulée de filetage pour un des sujets (F5). Il s'agit *d'une évaluation statique (sur image) de la posture la plus fréquente de cette opératrice.* Le **score global 7** a confirmé les **problèmes de pénibilité posturale** (angles articulaires en dehors du confort) identifiés auparavant et ainsi **la nécessité de modifier l'outil et le poste de filetage.**

Il convient de présenter un peu plus ce tableau de résultats incluant les scores RULA obtenus sous MANERCOS. Il s'agit en effet d'un score global (total), mais aussi de scores partiels, parmi lesquels nous trouvons *le score au niveau du bras, au niveau de l'avant-bras, tronc, etc.*

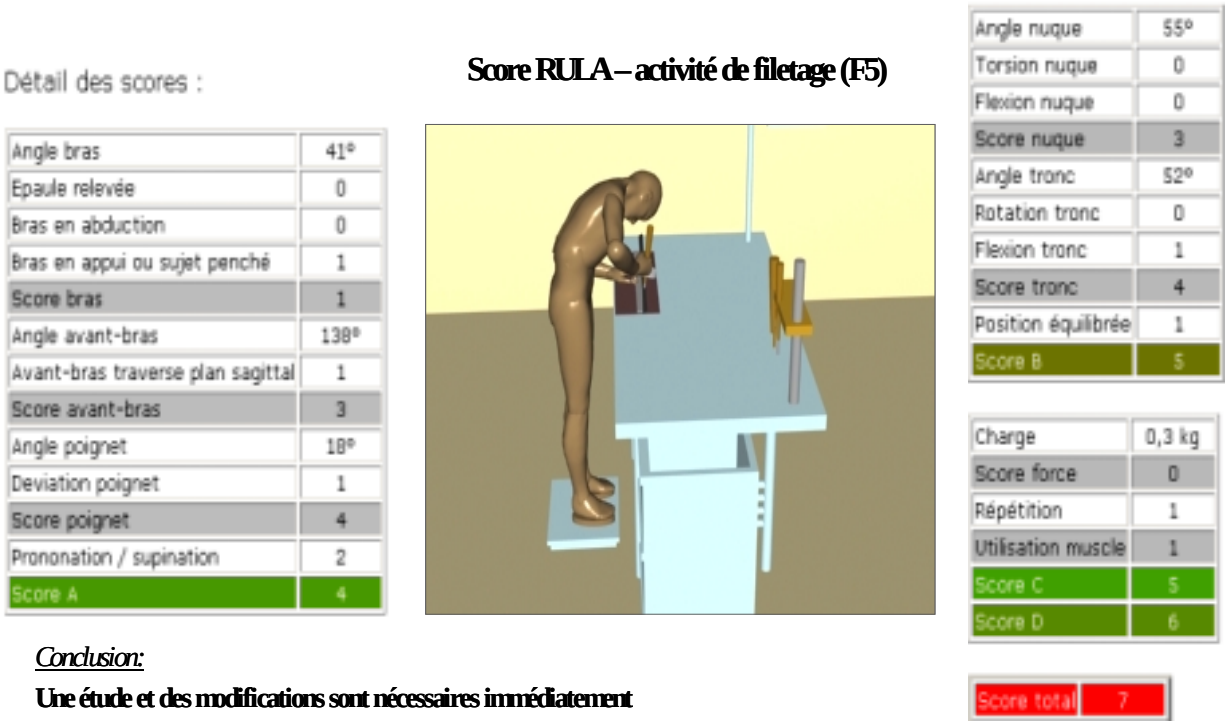


Figure III.37 Evaluation posturale RULA de l'activité simulée de filetage (sujet F5)

A partir du score total 7, une analyse approfondie a été possible grâce aux scores partiels. Ces derniers nous ont permis d'analyser et d'identifier rapidement les "membres " composants du corps humain, dans notre cas de l'opératrice F5, pour lesquels les postures étaient pénibles. Nous avons ainsi retrouvé *l'avant-bras (score RULA 3), le poignet (score RULA 4), le tronc (score RULA 4) et même la nuque (score RULA 3).*

Il convient de préciser que l'utilisation de la méthode RULA a eu pour objectif de mieux identifier, à travers les scores posturales RULA, "la corrélation" existant entre **les gestes et les postures de travail** et **l'outil et le poste de filetage** qui les imposent. L'analyse RULA des gestes et des postures qui découlent de l'usage de l'outil de filetage sur le poste de filetage nous a permis alors de déterminer les problèmes de conception de ces derniers.

Une **évaluation posturale en continu** de l'activité simulée a été également possible à travers la méthode RULA sous MANERCOS, le seul inconvénient étant le format des résultats. Il s'agit d'un fichier en format XML, contenant tous les scores RULA, tant globaux que partiels, fichier qui était difficilement exploitable. C'est pour cela que nous avons eu besoin de développer un petit logiciel capable d'extraire rapidement les scores à partir de ce fichier XML dans un format .txt, exploitable ensuite sous le logiciel Microsoft Excel. Nous n'insistons pas sur celui-ci, mais nous soulignons juste *la nécessité de faire évoluer la méthode RULA sous MANERCOS, notamment par l'amélioration de l'interface d'interprétation des résultats,* aspect sur lequel nous reviendrons.

La figure III.38 présente la répartition des scores globaux RULA de l'activité simulée de filetage pour deux de sujets (H95 et F5).

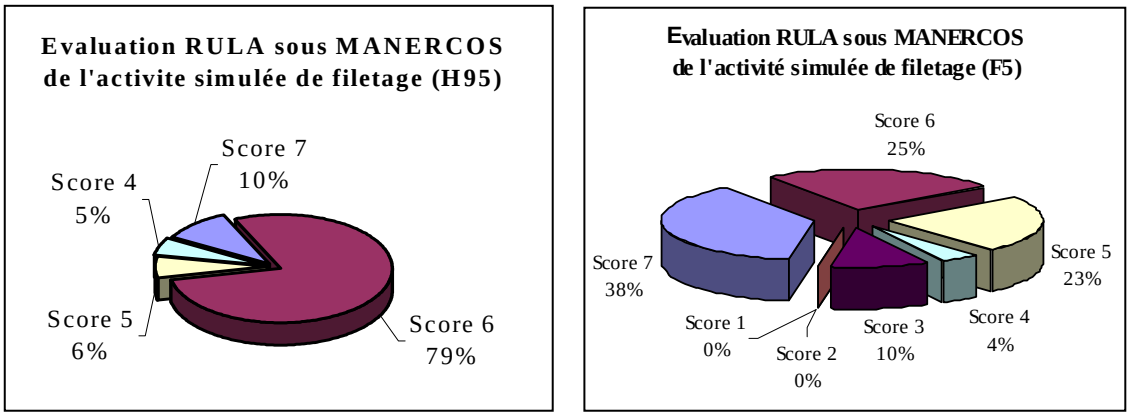

Evaluation RULA sous MANERCOS de l'activite simulée de filetage (H95)
Score 7 10%
Score 4 5%
Score 5 6%
Score 6 79%
Evaluation RULA sous MANERCOS de l'activité simulée de filetage (F5)
Score 6 25%
Score 7 38%
Score 5 23%
Score 1 0%
Score 2 0%
Score 3 10%
Score 4 4%

Figure III.38 Répartition des scores RULA pour la durée totale de l'activité simulée de filetage (sujets H95 et F5)

Ainsi, nous avons pu constaté à nouveau que le sujet de grande taille (H95) avait **des postures pénibles la plupart du temps de travail (96%)**, car *les scores RULA associés avaient des valeurs comprises dans l'intervalle de 5 à 7*, notes correspondant aux niveaux d'intervention urgente (3 et 4) sur le poste de travail étudié.

Concernant le sujet femme de petite taille (F5), nous avons constaté qu'elle se situe dans **une zone de pénibilité posturale moins élevée** par rapport au premier sujet, mais qui reste quand même très élevée pour l'activité de filetage qu'elle exécute. Il s'agit d'un *pourcentage de temps de 86%, quand la pénibilité posturale de l'opératrice F5 est de l'ordre de 5 à 7.*

*En effet, c*es résultats s'expliquent de manière similaire à ceux obtenus pour la phase d'analyse réelle. *Les différences proviennent des façons de travailler des opérateurs et bien sûr de leurs dimensions corporelles différentes.*

Par rapport à l'analyse en situation réelle réalisée dans la première étape, quand seules des évaluations "statiques" et à partir d'une image étaient possibles à travers la méthode RULA, l'outil MANERCOS a permis **une évaluation posturale totale (dynamique), continue pendant toute l'activité simulée de travail étudiée**.

Le manque apparu à ce stade était lié à la nécessité d'obtenir *une meilleure corrélation des scores RULA avec le temps/posture de travail simulé.* Pour une bonne interprétation de ces résultats, nous avons été obligés d'utiliser d'autres outils, fait qui a augmenté un peu le temps dédié à cette étape (figure III.39).

L'amélioration de ces aspects a été la base d'un développement de l'outil MANERCOS par la suite.

Figure III.39 Evolution du score RULA dans le temps. Corrélation "Score – Image (Posture)" pour l'activité de filetage (Sujet H95)

A ce manque nous pouvons ajouter également *les erreurs d'évaluation RULA* de l'activité simulée de filetage, d'ailleurs difficilement comparables avec ceux de l'analyse réelle. Cela s'explique par les écarts existant entre l'activité simulée et l'activité réelle, écarts provenant notamment de certaines limites de l'outil MANERCOS. Plus précisément, ce dernier disposait à ce stade de l'étude d'un nombre limité de segments corporels qui ne rendait pas facile la modélisation et la simulation du corps humain. De plus, son Module de conception et d'analyse de l'activité avait aussi ses limites, surtout au niveau de la décomposition de l'activité en comportements élémentaires.

Il est apparu ainsi souhaitable d'avoir la possibilité de décomposer l'activité plus en détail jusqu'au niveau des postures et gestes. Pour cela, la création de bibliothèques de postures et gestes semblait nécessaire. Celles-ci peuvent contribuer à la diminution du temps de dépouillement, donc du temps de passage du réel à la simulation. De nouveaux développements de MANERCOS, présentés par la suite, ont été prévus dans ce sens.

Malgré les problèmes évoqués, nous avons "considéré" valides les résultats obtenus, dont les scores RULA. En général, la méthode elle-même est considérée comme étant assez sévère. En effet, avec

l'utilisation de la grille RULA, les scores obtenus ont rarement des valeurs égales à 1 ou 2, correspondant à un niveau d'intervention 1, ce qui signifie que la situation étudiée ne doit pas être modifiée. D'après cette méthode, presque tous les postes de travail posent des problèmes aux opérateurs.
Cette affirmation nous amène à penser qu'il faut peut-être revoir cette méthode, afin de l'adapter à la réalité industrielle.

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation posturales, mais jusqu'à présent il n'y en a pas une qui semble plus précise ou correcte que l'autre. En fait, il n'y a pas une classification précise de celles-ci, pas de critères ou de recommandations d'emploi de l'une au détriment des autres. C'est pour cela que nous pensons ici qu'il est nécessaire d'avoir une réflexion dans ce sens, d'autant plus que ces méthodes sont intégrées ou s'intégreront dans des outils de type mannequin numérique.

En ce qui concerne notre travail, nous avons choisi d'intégrer la méthode RULA dans MANERCOS, en raison de ses facilités d'intégration et d'application qui nous permettaient de respecter nos délais de réalisation. Cependant, pour l'avenir de l'outil MANERCOS, avant d'associer d'autres méthodes à cet outil, telle que OWAS [Louhevaara,1992], MTM [Laring,2002],…, il apparaît nécessaire d'établir une comparaison des méthodes existantes en vue d'identifier les possibles apports de chacune d'entre elles et l'ordre des priorités.
Nous insistons sur cet aspect car, aujourd'hui il existe de nombreux types de mannequins numériques qui disposent de méthodes ergonomiques qui sont sous-exploitées. Cette sous-exploitation est liée soit à la complexité de la méthode, soit à sa complexité d'utilisation, soit à son inadéquation avec les objectifs pour lesquels le mannequin numérique a été conçu.
Nous pouvons citer par exemple l'outil SAFEWORK qui dispose de deux versions d'une méthode d'évaluation de la charge maximale admissible à la manutention des objets (NIOSH) [Waters,1992]. L'utilisateur n'a pas d'indications suffisantes pour l'aider dans le choix de la version adaptée à sa problématique.
La question qui se pose par rapport à cela est de savoir jusqu'à quel niveau nous devons développer les outils de ce type et avec quels sacrifices, quels coûts. Souhaitons-nous développer des outils de plus en plus complexes et de moins en moins utilisables? Est-il préférable d'utiliser les outils tel qu'ils sont, mais dans un meilleur contexte? A titre d'exemple c'est ***la démarche d'utilisation que nous proposons pour l'outil MANERCOS dans la conception de produits, une démarche qui met en place des liens entre les étapes et les outils déjà existants dans le processus.***

Nous avons intégré la méthode RULA sous MANERCOS car cet outil ne disposait pas d'un moyen d'évaluation de l'activité posturale.
Celui-ci dispose d'autres méthodes d'évaluation ergonomique, mais qui ne sont pas nécessaires pour étudier une activité de ce type.

A part la méthode RULA, nous avons utilisé également les critères d'évaluation du **volume de confort** et celui d'**atteinte** et du **champ visuel**.
Ainsi, la figure III.40 met en évidence la liaison existant entre *le volume de confort* (demi sphère rouge) dans lequel l'opérateur doit travailler et *la limite d'atteinte* (demi sphère bleu) qu'il ne doit pas dépasser.

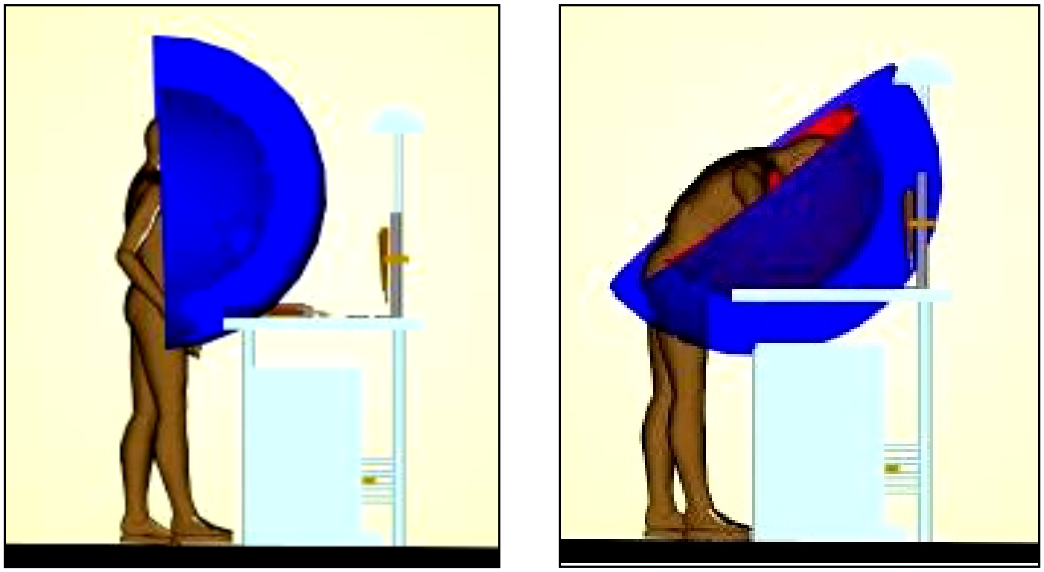


Figure III.40 Evaluation du volume de confort et de l'atteinte pour le poste de filetage (H95)

Dans la première image, quand l'opérateur (H95) est en posture "débout", posture idéale, considérée sans risque, nous avons constaté que le poste de travail, plus précisément **le plan de travail, n'était pas situé dans la zone de confort indiquée par les normes, mais juste à la limite de la zone d'atteinte.** Apparemment, **le plan de travail était trop bas par rapport à la hauteur de l'opérateur**, ce qui peut expliquer *la répartition des angles périarticulaires, issue de l'analyse RULA ou de la centrale CAPTIV.* Pour atteindre les outils, le plan et l'objet de travail, l'opérateur était *obligé de se pencher et d'avoir ainsi une posture très contraignante*, comme l'illustre la deuxième image (figure III.39).

Comme pour les *demi-sphères de confort* et *d'atteinte* associées au mannequin numérique, qui sont modulables en fonction des dimensions anthropométriques de celui-ci, "le cône visuel" a eu pour rôle de délimiter le champ visuel du mannequin. L'évaluation du champ visuel est venu ainsi compléter les

précédentes analyses en mettant en évidence *la posture toujours pénible de l'opérateur pendant son travail pour pouvoir visualiser son espace de travail* et les composants de celui-ci (figure III.41).

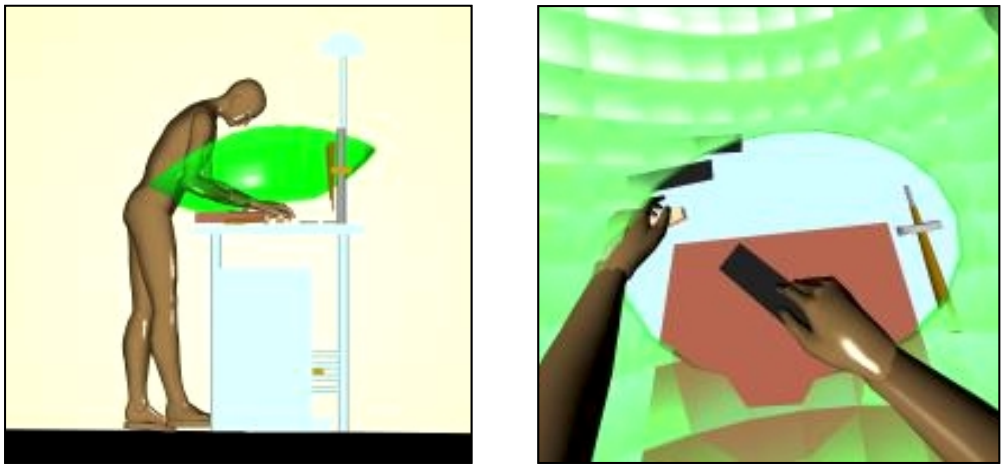


Figure III.41 Evaluation du champ visuel pour le poste de filetage (Sujet H95)

De plus l'activité de filetage demandait *une grande précision* et en conséquence une *très bonne visibilité*. L'opérateur avait dans ce cas *une posture de plus en plus penchée*, d'autant que le plan de travail était déjà trop bas par rapport à sa taille.

Pour l'autre sujet (F5), les résultats de ces évaluations ont mis en évidence **des problèmes au niveau du plan de travail** : cette fois celui-ci était ***trop haut par rapport à l'opératrice de petite taille.*** Cette dernière utilisait d'ailleurs une estrade pour se rapprocher davantage du plan de travail (figure III.42).

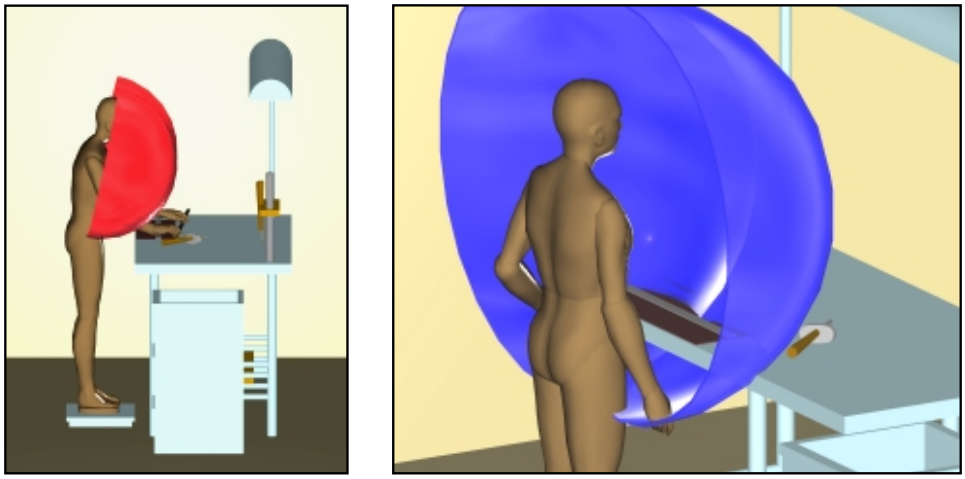


Figure III.42 Evaluation du volume de confort et de l'atteinte pour le poste de filetage (F5)

Cela peut expliquer les raisons pour lesquelles *les postures de l'opératrice F5 sont apparues un peu moins pénibles que celles de l'opérateur de grande taille (H95)*, même si elles restaient en général *en dehors de la zone de confort.*

Par rapport au champ visuel, nous avons constaté le même problème de pénibilité posturale,

notamment au niveau de la nuque ; la cause en était toujours la précision demandée par l'activité de filetage (figure III.43)

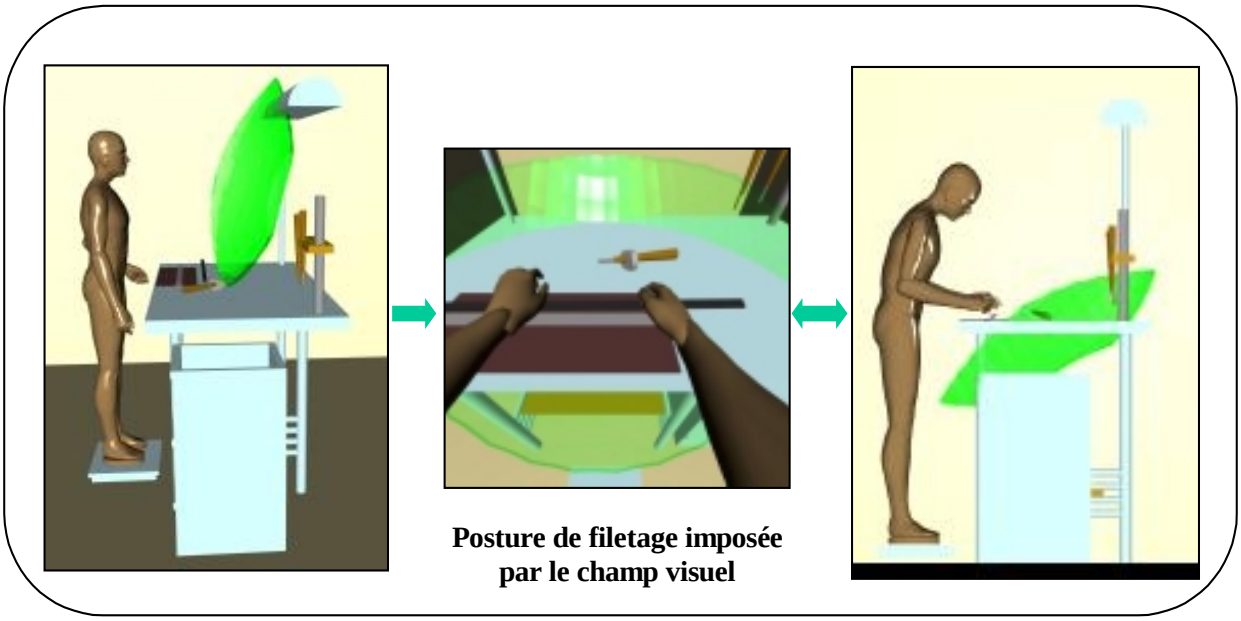


Figure III.43 Posture de travail imposée par le champ visuel (Sujet F5)

Analyse et interprétation de résultats par le groupe GT-LMS

Les résultats de ces évaluations ainsi que ceux provenant de la première phase d'analyse de l'activité réelle de filetage ont fait ainsi l'objet de discussions au sein du groupe de travail GT – LMS, discussions auxquelles les opérateurs participaient toujours activement.

Quatre types de problèmes ont été retenus comme étant prioritaires, et ceux-ci concernaient :

- **les efforts imposés par le filetage,**
- **la pénibilité posturale,**
- **la répétitivité des gestes,**
- **la mauvaise prise en compte du champ visuel.**

Après plusieurs réunions de travail et en prenant en compte la spécificité de la production de l'entreprise (**produits à caractère artisanal**), le groupe projet a décidé d'approfondir simultanément les deux directions :

***- l'activité de filetage manuel* -** La re-conception de l'outil existant de filetage avait comme objectif d'améliorer les conditions de travail des opérateurs. Mais l'aboutissement de ce projet posait une multitude de problèmes qu'il semblait difficile de résoudre dans *un délai aussi court (quelques semaines)* et avec *un budget alloué assez réduit*. Il fallait transformer l'outil à main sans faire beaucoup de modifications d'ordre technique. En effet, le principe de

fonctionnement avec le "filet" d'un certain profil, échauffé à une certaine température, devait être gardé. Ainsi il a fallu envisager, à court terme, plutôt une modification de la **"forme et des dimensions"** de l'outil de filetage.

D'où la conception d'un **nouvel outil à main,** en accord avec ***le métier et l'initiative des opérateurs*** et ***en gardant la qualité*** *et* ***le caractère artisanal des produits***.

***- l'activité de filetage mécanisé* -** Plus précisément, pour la diminution voire l'élimination de la pénibilité, le groupe GT-LMS a proposé l'automatisation de l'activité par l'introduction d'une **machine de pré-filetage**. Cette dernière devrait avoir un rôle d'assistance de l'opérateur dans la réalisation du filetage "grossier", la finition étant toujours réservée au travail à la main de l'opérateur, donc au travail avec le nouvel outil de filetage.

A ce stade de l'étude, le groupe projet disposait *de données objectives relatives à la pénibilité de l'Activité Gestuelle et Posturale des opérateurs*. Il fallait donc s'appuyer sur celles-ci pour proposer des solutions de préconcepts capables de résoudre ces problèmes. C'est pour cela que le but de l'étape suivante a été ***de définir les activités de travail futures souhaitables*** *pour les opérateurs, en terme de posture, répétitivité, effort, etc.*

Le paragraphe suivant montre comment il a été possible de proposer des solutions de préconcepts d'outils de filetage adaptés à l'opérateur, à travers des Activités Gestuelles et Posturale Futures Souhaitables simulées à l'aide du mannequin numérique MANERCOS.

III.2.2.1.3 Définir certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail à l'aide d'un mannequin numérique

Il s'agit ici de mettre en évidence le rôle des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables simulées de filetage, définies à l'aide de l'outil MANERCOS, dans la proposition des préconcepts. Celles-ci peuvent être considérées également comme des "objets intermédiaires" de conception des futurs outils de filetage.

Il convient de rappeler ici **"les comportements élémentaires réels - CER"** que nous avons utilisés pour ***décomposer, simuler et analyser*** l'Analyse de l'Activité Gestuelle et Posturale Réelle (AGPR) de filetage. De la même manière et sur la base de ces analyses, nous avons défini certains **"comportements élémentaires futures souhaitables – CEFS"** en vue de ***composer*** **certaines Activités Futures Souhaitables (AFS) de filetage.** Pour cela nous avons utilisé le mannequin numérique MANERCOS auquel nous avons associé dans un premier temps **"des gestes et des**

postures de moindre inconfort". Celles-ci ont servi dans un deuxième temps à ***la définition de plusieurs CFS***, les futures tâches correspondant en effet à la future activité de filetage (figure III.44).

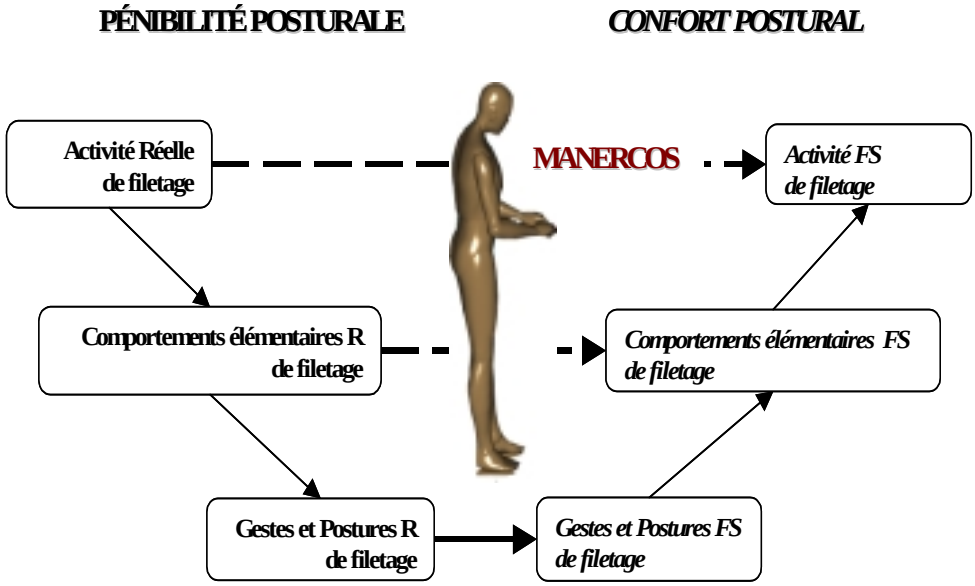


Figure III.44 Définition des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables à l'aide de l'outil MANERCOS

Ainsi, grâce à l'outil MANERCOS, il a été possible de définir et simuler **trois types d'Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de filetage**, en transformant "***des mauvaises gestes et postures***" révélant ***la mauvaise conception des système de travail de filetage*** en "***gestes et postures de moindre inconfort***" définissant **la bonne conception (anthropocentrée) de futurs systèmes de travail de filetage**.

Les trois images présentées par la figure III.45 sont issues **des trois films associés à ces activités FS** et mettent en évidence en particulier **les mouvements des membres supérieurs proposés pour les futurs opérateurs :**

- **filetage horizontal "devant",** la main exécute des mouvements "aller-retour" pendant lesquels la position du poignet reste en confort (angles de flexion/extension de confort-0/30 et angles de abduction/adduction de confort – 0/0), tout au long du bras (Figure III.45a);
- **filetage horizontal "latéral" à une seule main**, la main exécute des mouvements "aller-retour" pendant lesquels la position du poignet reste en confort, tout au long du bras (Figure III.45b);
- **filetage horizontal "latéral" à deux mains,** les deux mains exécutent des mouvements "aller-retour" pendant lesquels la position des poignets reste en confort, tout au long du bras (Figure III.45c).

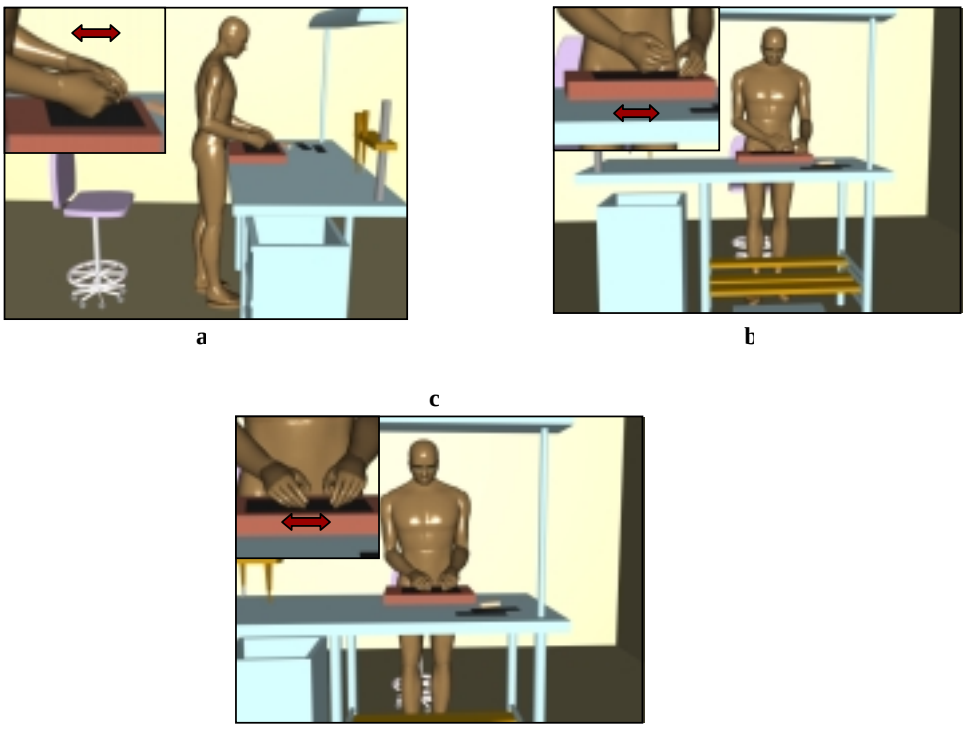


Figure III.45 Définition et simulation de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables à l'aide du mannequin numérique MANERCOS

Nous mentionnons que, en plus de gestes et postures futurs souhaitables pour le poignet, nous avons proposé des comportements futurs souhaitables pour le coude (angles de flexion/extension de confort - 60/0) et même pour le tronc (angles de flexion/extension de confort – 0/0), etc.

Après plusieurs réunions autour de ces trois films, les participants du groupe projet GT-LMS, notamment *les concepteurs et les ergonomes, mais aussi les opérateurs*, ont mis en évidence l'importance de ces activités FS par rapport à l'activité réelle de filetage, considérée "à risque". Il s'agit en effet de **la conception des certaines activités GP futures souhaitables**, qui favorise, par rapport à l'activité GP réelle, ***une amélioration des postures au niveau du poignet, de l'avant-bras et du bras***, mais aussi **du tronc et de la nuque**.

En conséquence, **les deux premières activités** (Figure III.45 - a et b) **ont été retenues pour la variante de filetage manuel** et **la troisième pour le filetage mécanisée** (Figure III.45 - c).

Deux groupes de travail réunissant principalement des concepteurs se sont constitués pour travailler en parallèle sur la définition des préconcepts :

- un GROUPE ACTIVITE MANUELLE (GT- MAN) qui avait pour mission de proposer des nouveaux outils à main portatifs,

- un GROUPE ACTIVITE MECANISEE (GT- MEC) qui devait concevoir une machine de pré-filetage.

Compte tenu de la spécificité de nos travaux dans le domaine du Génie de Systèmes Industriels, notamment à l'interface des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences Humaines, nous nous sommes également associés à ces groupes avec la mission précise ***de veiller à la prise en compte des aspects ergonomiques***, notamment les caractéristiques physiques humaines, dans la proposition des préconcepts.

Il s'agissait en effet de trouver *la meilleure manière de combiner les critères techniques de filetage avec les critères ergonomiques issus des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables proposés auparavant*.

A l'appui des résultats obtenus lors des étapes précédentes et à l'occasion de nombreuses réunions de travail et séances de créativité, les deux groupes GT - MAN et GT- MEC ont travaillé sur ***la définition du cahier de charges fonctionnel (CdCf) des futurs outils de filetage, à main et mécanisé (***figure III.46). Ainsi, des méthodes spécifiques de conception telles que l'Analyse Fonctionnelle et l'Analyse de la Valeur [AFAV,1997] ont été utilisées à ce stade pour déterminer et prendre en compte ***les critères techniques et économiques*** de conception des futurs outils de filetage.

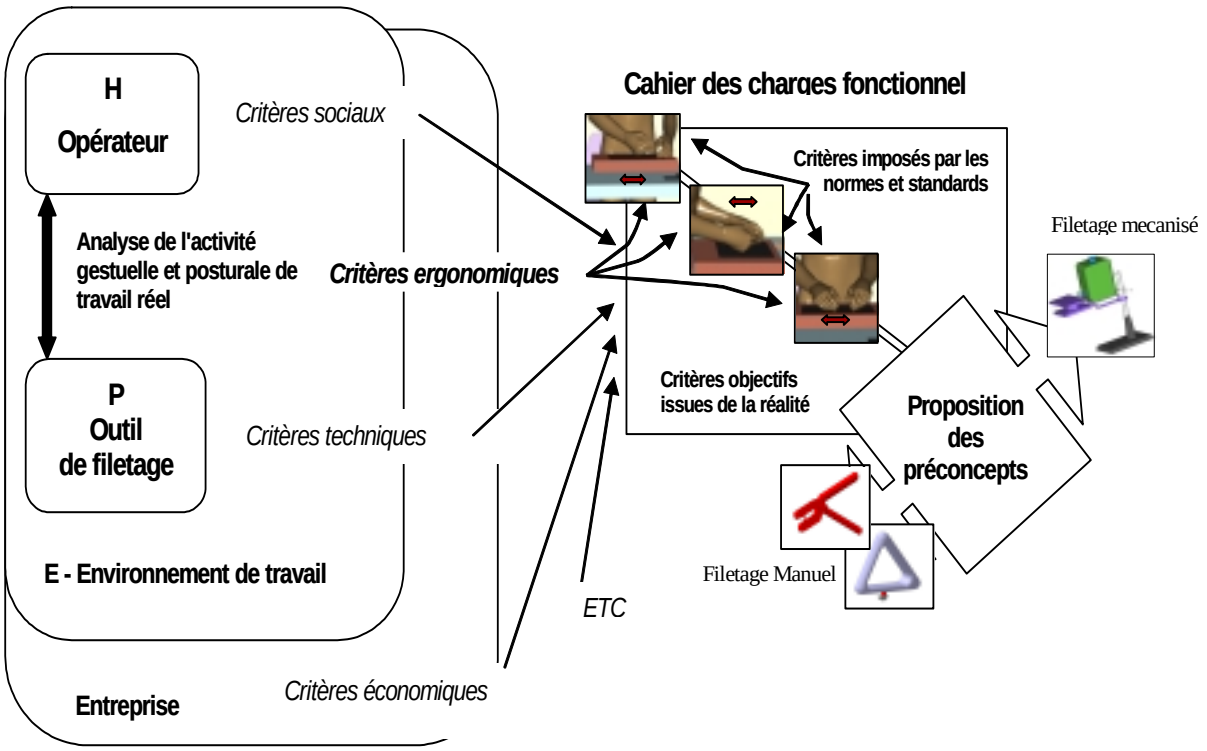


Figure III.46 Le rôle des activités GPFS dans la définition du CdCf et la proposition des préconcepts

Les Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de filetage définies auparavant ont permis **d'enrichir le CdCf** et **de proposer avec le groupe projet, dans de délais réduits, plusieurs préconcepts des outils de filetage** (figure III.46). Ces derniers *devaient donc résoudre les* ***problèmes d'ordre ergonomique*** *soulevés par l'outil existant de filetage.*

Tous ces aspects seront abordés dans les paragraphes suivants, où nous allons décrire comment les solutions finales ont été proposées dans le deux cas : *travail manuel* et *travail mécanisé.*

III.2.2.2 Rechercher des solutions pendant la Phase 2 (Etudes préliminaires)

Nous allons présenter ici la deuxième phase de l'intervention du groupe GT-ERCOS qui s'est déroulée suivant le plan d'action évoqué dans la figure III.7.

III.2.2.2.1 Définir des pré-concepts à travers la simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables de travail

A. Activité de travail manuelle. Proposition des pré-concepts d'outils à main

Les différents supports (schémas, croquis,..) utilisés pour représenter les propositions de solutions ont permis au groupe GT-MAN d'en retenir deux et de les modéliser en 3D à l'aide des outils CAO.

Nous présentons ainsi les deux préconcepts retenus pour l'activité de filetage manuel, **une pince** (figure III.47 a.) et **une scie** (figure III.47 b), conçues volontairement modulables en vue de les faire évoluer à tout moment.

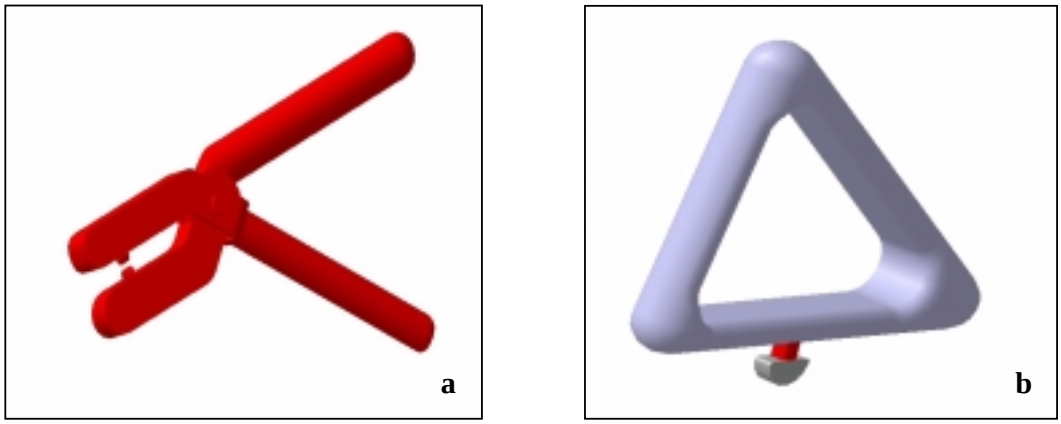


Figure III.47 Préconcepts d'outil à main proposés à l'appui des activités FS de filetage (a-Pince ; b - Scie)

Préconcept 1: LA PINCE

Il s'agit d'un outil de filetage en forme de pince, qui a pour objectif principal de diminuer l'effort de filetage et d'améliorer l'Activité Gestuelle et Posturale de l'opérateur. Son **principe de fonctionnement** assez simple a été pensé ainsi *: une première phase de serrage du cuir entre deux filets circulaires de même profil que celui de l'outil existant et, ensuite, le déplacement sur le cuir*. Cet outil permet donc un *filetage simultanément des deux côtés du cuir avec un effort assez réduit*.

Préconcept 2: LA SCIE

Cet outil de filetage en forme de scie permet à l'opérateur de *travailler en gardant le poignet dans une position alignée avec l'avant-bras*. L'objectif est évidemment *l'amélioration de l'activité posturale*, notamment *au niveau du poignet*. Son principe de fonctionnement est identique à celui de l'outil existant, l'opérateur gardant ainsi son métier, sa dextérité, ses réflexes de filetage.
Nous évoquons également, mais sans insister, la variante de "scie à filet orientable" qui a été également proposée, mais qui n'a pas fait objet d'étude pour la suite.

B. Activité de travail mécanisée. Proposition des pré-concepts de la machine de pré-filetage

Le groupe GT- MEC a proposé **une machine de pré-filetage** que nous allons décrire par la suite.
Si les concepteurs du groupe GT-MAN se sont appuyés sur *les deux premières Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables* (figure III.45 a,b) pour proposer les préconcepts des futurs outils à main, les concepteurs du groupe GT-MEC ont eu comme support la troisième activité FS (figure III.45 c) pour définir les préconcepts de la machine de pré-filetage.
Ainsi, la figure III.47 illustre le préconcept initial de la machine de pré-filetage proposée pour éliminer la pénibilité de la tâche.
Sa particularité consiste *dans les deux bras de filetage* prévus avec deux filets sous forme de roues, de section similaire à celui du "fer à fileter". Entraînées dans un mouvement de rotation par un moteur et chauffées à une température dite de "filetage", ces deux roues permettent un filetage simultané des deux côtés du cuir. Dans ce cas, l'effort de pression nécessaire au filetage du cuir est fourni par l'énergie mécanique de la machine par l'intermédiaire de ces deux bras (figure III.48). Cet effort est facilement paramétrable en fonction des caractéristiques du matériau (cuir) à fileter.

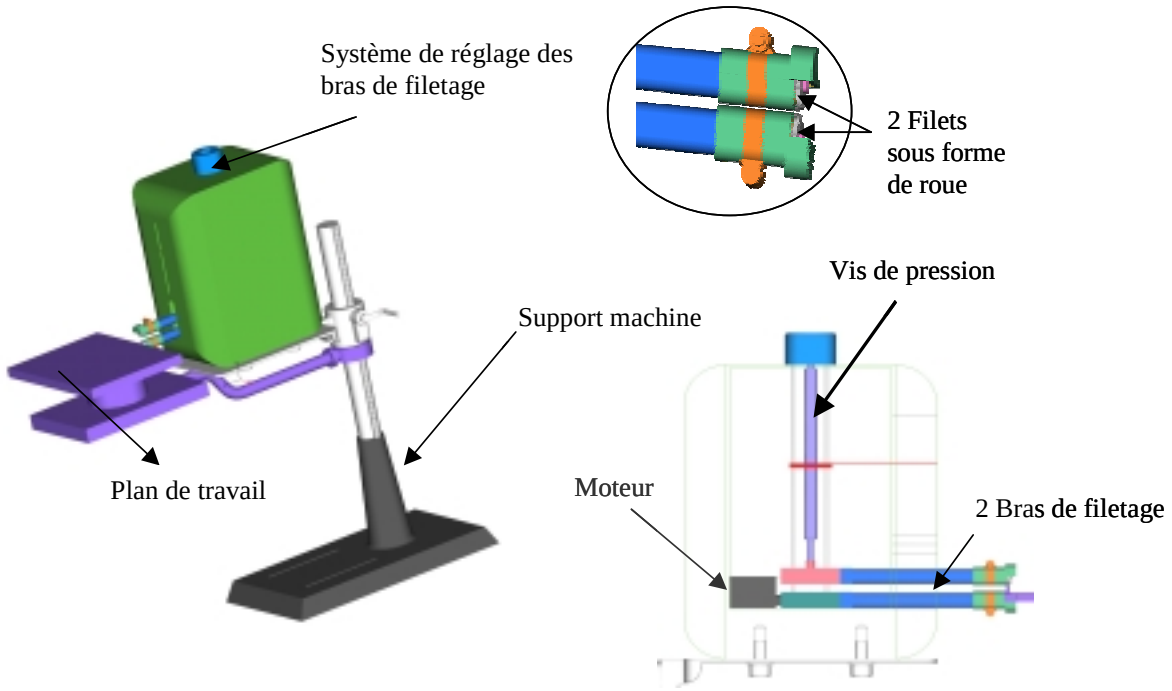


Figure III.48 Premier préconcept de la machine de pré-filetage

En effet, la machine de pré-filetage proposée envisage *la résolution des problèmes d'efforts au filetage*, *de pénibilité posturale*, mais tout cela *en gardant le savoir-faire de l'opérateur, son regard et la facilité de manipulation du cuir* (figure III.49). Cette dernière consiste ici dans le guidage du cuir en vue d'obtenir un filetage uniforme et de qualité.

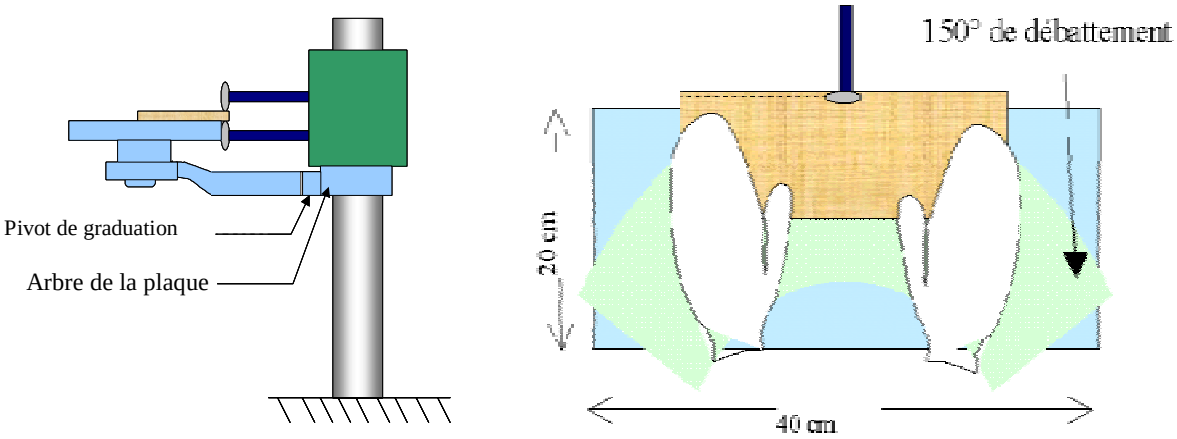


Figure III.49 Principe de fonctionnement de la machine de pré-filetage proposée

Les paragraphes suivants présentent l'étape d'évaluation de ces solutions de préconcepts et choix d'une solution acceptable.

III.2.2.2.2 Evaluer ergonomiquement les pré-concepts proposés. Choix du meilleur pré-concept

A. Activité manuelle de filetage

Après avoir proposé les préconcepts des outils à mains, les groupes projets ont réalisé leurs évaluations et cela à travers différents critères, *techniques, économiques, sociaux et ergonomiques.* Nous présentons ici uniquement la démarche ***d'évaluation ergonomique*** et à la fin une synthèse globale de ces évaluations.

Afin de réaliser ces évaluations, l'étape suivante consiste à *simuler les Activités Gestuelles et Posturales Futures (AGPF) des futurs opérateurs*, activités réalisées cette fois avec les préconcepts proposés (exemple dans la figure III.50).

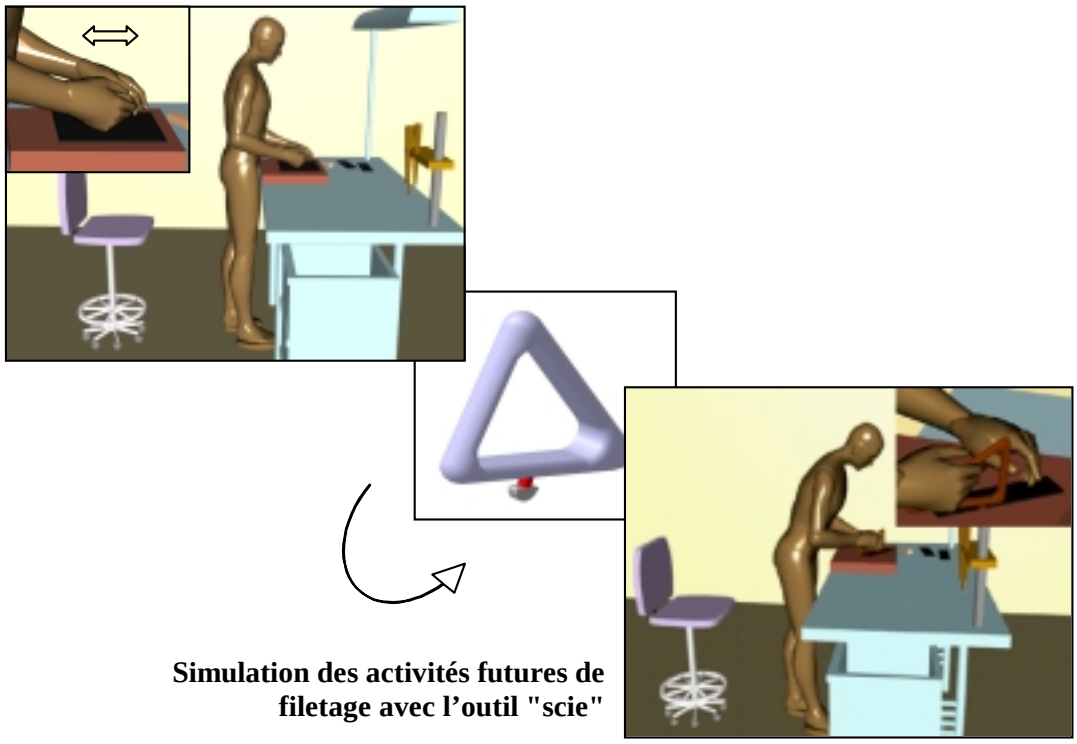


Figure III.50 De la simulation des AGPFS à la simulation des AGPF de filetage. Filetage à scie

Ces simulations réalisées à l'aide de l'outil MANERCOS ont eu pour but ***l'évaluation ergonomique des préconcepts proposés*** en suivant la méthode présentée dans le cas de *l'évaluation de l'activité simulée de filetage réel.*

<u>Préconcept 1:</u> Evaluation ergonomique de l'activité de filetage avec LA PINCE

L'analyse ergonomique de l'activité simulée de filetage a mis en évidence les avantages que l'outil "pince" apporte au filetage, mais aussi ses inconvénients.
Les films vidéo résultant de la simulation numérique de l'activité ont représenté les supports de discussion et d'analyse pour le groupe GT-MAN (figure III.51). Une analyse globale de cette activité a été ainsi possible pour montrer dans un premier temps les tâches effectives prévues pour le futur opérateur.

Dans un premier temps, l'opérateur doit préparer et fixer le cuir en utilisant un support classique et facile à réaliser. Il doit ensuite serrer la pince pour écarter les deux bras, donc les filets et, ensuite, la relâcher permettant la fermeture des deux filets sur la bordure du cuir à l'endroit choisi. Le filetage est réalisé ensuite par des mouvements "aller- retour " de la pince en contact avec le cuir.

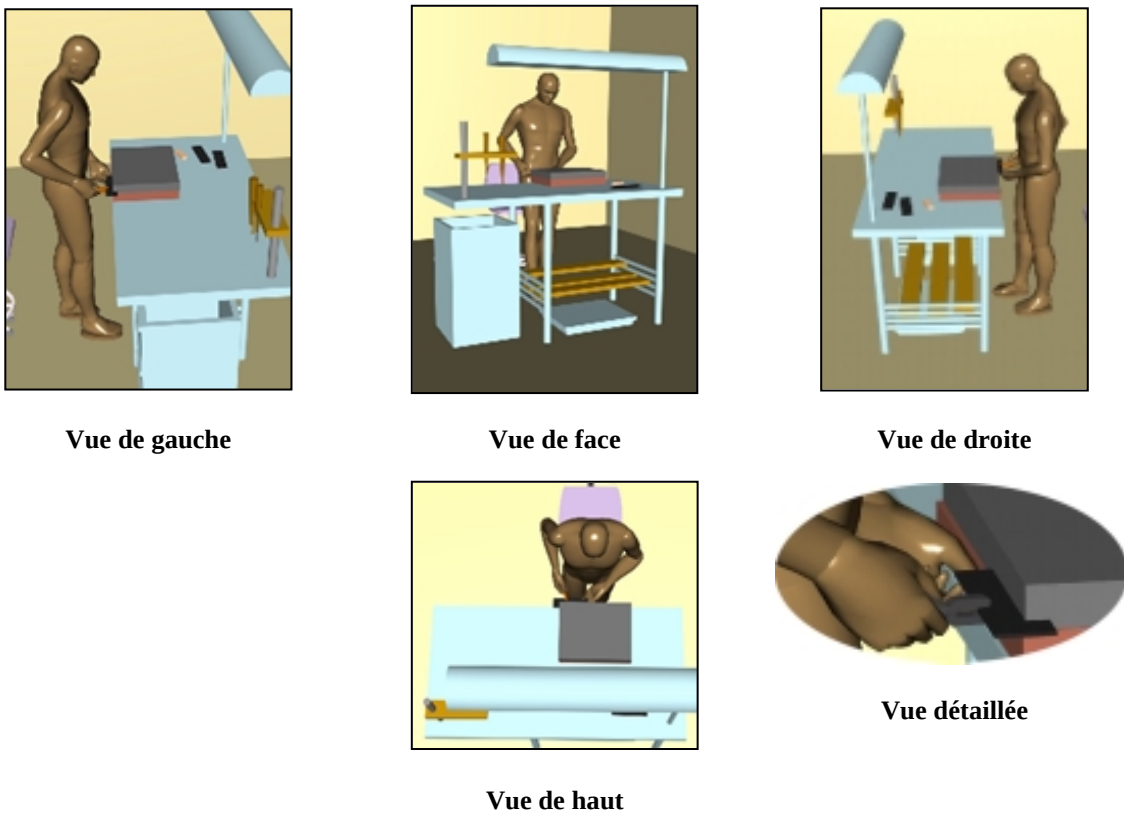


Figure III.51 Analyse de l'activité de filetage avec la pince

Les postures du poignet, du bras et de l'avant-bras de l'opérateur sont dans ce cas *moins pénibles* que celles identifiées en situation de travail réelle (figure III.52).

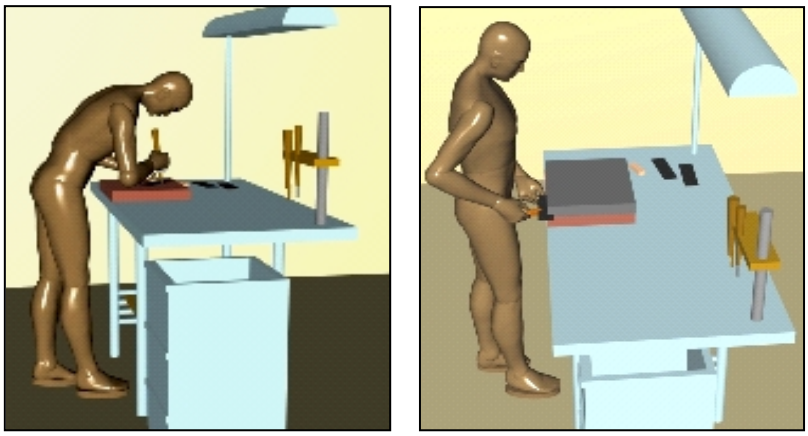


Figure III.52 Analyse comparative des postures simulées de "filetage réel – filetage à pince"

Par contre, *le manque de visibilité* due à l'éloignement du cuir impose à l'opérateur une posture penchée au niveau de la nuque.

Ainsi, l'analyse globale met en évidence **une amélioration significative des efforts de filetage**, mais aussi **des améliorations au niveau des postures de travail**.

Pour quantifier ces évaluations, le groupe GT-MAN a réalisé une évaluation posturale RULA de l'activité simulée à travers l'outil MANERCOS.

Ainsi, dans le cas de la pince, la figure III.53 montre **un score RULA majoritaire de** 4 qui correspond bien à l'activité de filetage assez uniforme, possible à travers cet outil.

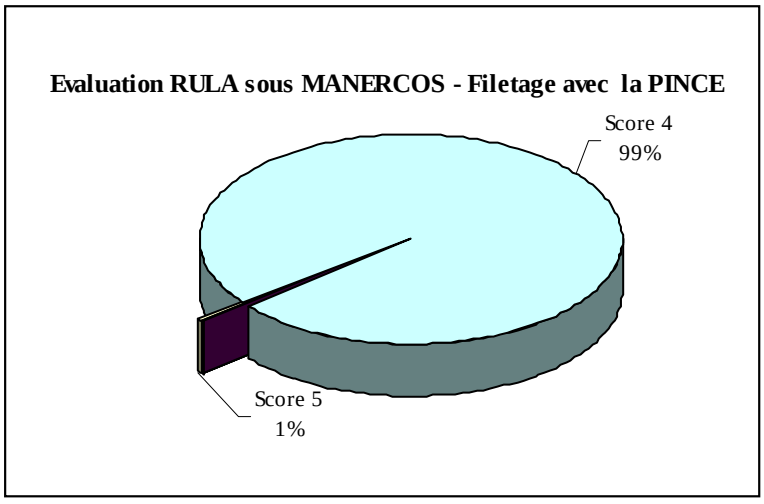


Figure III.53 Evaluation de l'activité posturale de filetage à la pince (H95)

Les résultats des autres évaluations telles que *celles du volume d'atteinte, de confort ou du champ visuel,* sont assez manifestés et conduisent à la même conclusion. **Le filetage à « pince » apporte des**

améliorations en terme de postures et d'efforts, mais il reste encore du travail à faire au niveau de l'outil pour augmenter la visibilité et la précision de filetage.

<u>Préconcept 2:</u> Evaluation ergonomique de l'activité de filetage avec LA SCIE

De la même manière, a été simulée l'activité future souhaitable de filetage à la scie, permettant ensuite son évaluation à l'aide de l'outil MANERCOS.
La figure III.54 illustre ainsi les films résultant de la simulation de cette activité en tant qu'interactions entre les composants du système virtuel "Opérateur – Scie - Environnement de travail".

Une analyse globale de l'activité simulée montre, dans ce cas, *une amélioration posturale au niveau du poignet, de l'avant bras et du bras*. Le tronc garde toujours une position penchée et cela d'abord en raison de l'effort important que doit fournir l'opérateur, mais aussi de la visibilité réduite de la tâche.

Vue de droite **Vue de face** **Vue de gauche**

Figure III.54 La simulation de l'activité de filetage à "la scie" (H95)

Ces résultats ont été ensuite quantifiés à l'aide de la méthode d'évaluation RULA intégrée sous MANERCOS. Pour illustrer cela la figure III.55 représente une image de la scène de simulation 3D réalisée à l'aide du logiciel 3D Studio Max et l'évaluation RULA statique effectuée pour une des postures de l'opérateur.

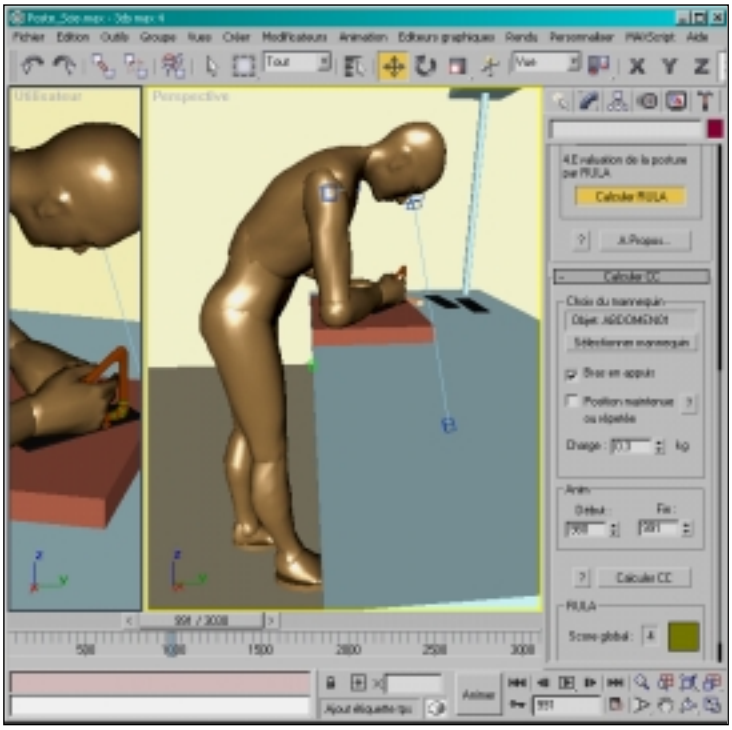


Figure III.55 Scène 3D représentant l'évaluation posturale RULA de l'opérateur (H95)

Le score RULA 4 obtenu dans ce cas met en évidence **une posture moins pénible par rapport à la posture la plus fréquente en filetage réel,** posture notée généralement avec des scores RULA de 6 et 7.

Cela est présenté à titre d'exemple car, pour pouvoir tirer des conclusions vis-à-vis des améliorations au niveau postural, une évaluation globale RULA a été nécessaire. Réalisée à l'aide de l'outil MANERCOS, elle a montré de faibles améliorations des scores obtenus.

La figure III.56 présente ainsi la répartition des scores globaux RULA dans la durée totale de l'activité simulée de filetage à la scie.

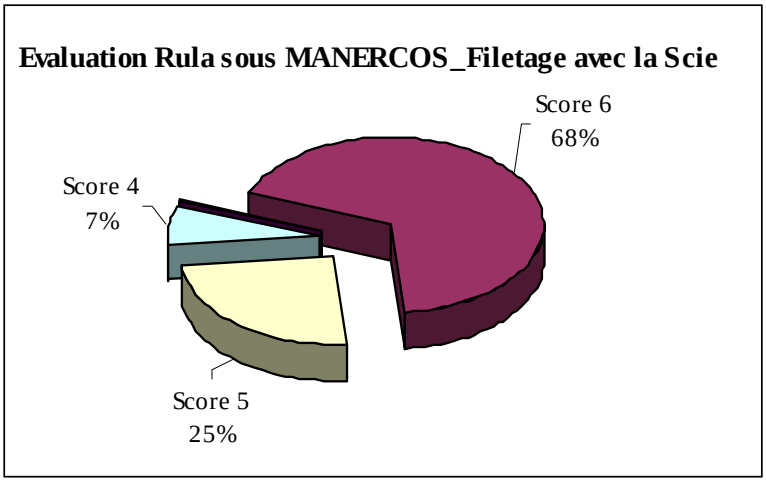


Figure III.56 Répartition des scores RULA dans la durée totale de l'activité simulée (H95)

Les scores RULA associés aux secteurs représentés ci-dessus montrent **une certaine amélioration au niveau postural** car ils sont inférieurs de quelques pourcentages à ceux de l'activité réelle. Cela s'explique en fait par **une amélioration de la posture au niveau du poignet**. Toutefois, **la posture globale de l'opérateur pendant le filetage reste assez contraignante et les efforts importants, faits qui imposent d'autres études et améliorations de l'outil proposée.**

Les évaluations du volume d'atteinte, du volume de confort et du champ visuel ne sont pas nécessaires ici, car l'activité ne change pas beaucoup dans ce sens, les modifications étant apportés uniquement au niveau de la forme de l'outil de filetage.

Nous avons ainsi présenté deux des préconcepts proposés pour l'activité de filetage et leur évaluation d'un point de vue ergonomique, réalisée à travers la simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale Future de filetage.
Ces résultats s'ajoutent aux autres évaluations d'ordre technique, économique et social, auxquelles ont participé les représentants de l'entreprise, des concepteurs, des ergonomes, des médecins du travail, mais aussi des opérateurs. Ces derniers ont été consultés pour donner leurs avis sur la future activité de travail et sur les outils associés.

Un tableau de synthèse de ces évaluations est présenté dans la figure III.57 et a pour but de mettre en évidence les principaux avantages et inconvénients des différents pré-concepts.

AVANTAGES		**INCONVÉNIENTS**
• Outil simple • Peu encombrant • Filetage symétrique • Effort à fournir faible et ponctuel		• Diminution de la précision • Diminution de la vision
• Matériaux simples (plastique, bois) • Prix • Réflexes de filetages gardés • Position optimale du poignet		• Problèmes des efforts non résolus (formation) • Problème de précision

Figure III.57 L'analyse comparative des préconcepts d'outil à main proposés

B. Activité mécanisée de filetage

Si la proposition du préconcept de la machine de pré-filetage s'est appuyée sur l'Activité Gestuelle et Posturale Future Souhaitable simulée (figure III.45 c), son évaluation ergonomique a été possible par l'intermédiaire de la simulation numérique de l'Activité GP Future de filetage mécanisée. Cette dernière a permis dans un premier temps aux acteurs du projet GT-MEC **de se rendre compte de la nécessité d'une évolution rapide du préconcept proposé initialement**. *En effet, ce modèle (figures III.48 et III.49) était prévu pour une fixation directe sur le plan de travail initial, c'est-à-dire la table existante dans l'atelier. Le système de fixation existant dans le commerce retenu pour cela conduisait à une hauteur du plan de travail très élevée par rapport à la taille de l'opérateur.*
Il correspondait à un positionnement des deux bras de filetage, très haut par rapport au sol et au socle du système. Cela a été mis en évidence lors de la simulation de l'activité future de filetage. Il a fallu travailler d'abord sur l'implantation du préconcept numérique de la machine de pré-filetage proposée dans la scène 3D représentant l'environnement virtuel de travail existant (atelier de travail).

Des problèmes liés à ce pré-concept sont apparus au moment de l'utilisation de l'outil MANERCOS, notamment la génération d'un mannequin numérique d'une certaine taille. L'impossibilité pour ce dernier d'accéder au plan de travail proposé par le préconcept de la machine de pré-filetage a fait ressortir *la nécessité de modifier le système de fixation de la machine, en proposant un autre avec un socle implanté directement dans le sol.*

La figure III.58 illustre bien la transformation du préconcept initial, proposée à l'aide de l'Activité GP Future Souhaitable de filetage mécanisée, en concept final, résultat d'une conception basée sur l'Activité GP Future de filetage.

Les autres modifications apportées, au fur et à mesure, au préconcept initial sont liées à *la posture de travail, à la position de filetage, au plan de travail, aux commandes de la machine, au réglage du cuir, etc.*

Ainsi, le préconcept final a été conçu de manière à ce que la position de travail soit principalement en posture "debout ", mais également "assis-debout", postures respectant la norme X35-104 [AFNOR,1983]. Un siège ergonomique a été prévu dans la deuxième situation.
Au niveau de la **position de filetage** qui pouvait varier grâce au système de réglage prévu initialement, **la position horizontale** a été retenue. La position verticale de filetage a semblé très contraignante pour l'opérateur car elle imposait une pénibilité posturale au travail.

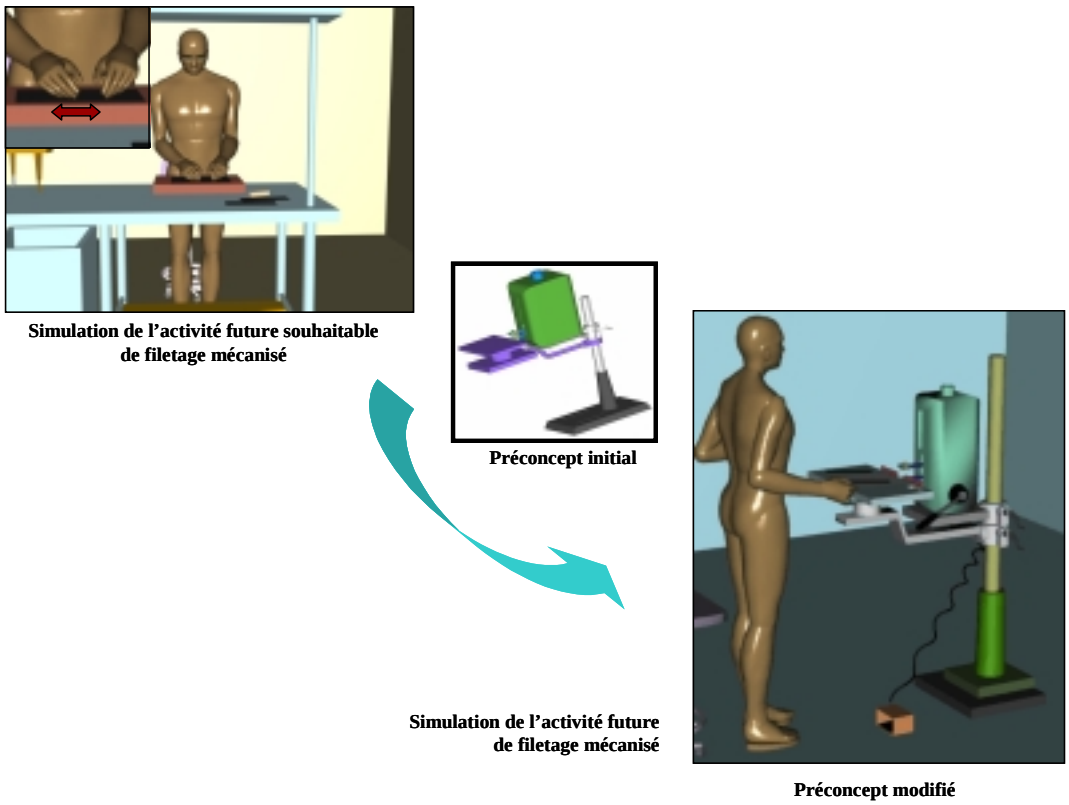


Figure III.58 L'évolution du préconcept proposée pour la machine de pré-filetage (H95)

Le poste de travail a été aussi modifié selon la norme X35 – 004 intitulée *"Postures et dimensions pour l'homme au travail sur machines et appareils"* [AFNOR, 1983] en vue de faciliter le travail du futur opérateur, en terme d'espace de travail, possibilité de rangements des outils, etc.

Pour les **commandes de la machine de pré-filetage**, une manette a été ajoutée pour le réglage des deux bras de filetage (approchement et éloignement) et elle a remplacé le système prévu initialement. Ce dernier, situé au-dessus de la machine de pré-filetage, s'est montré mal positionné et son utilisation est apparue difficile pour les futurs opérateurs. Une pédale a été ajoutée également en conformité avec la norme X 35-105 – intitulée *"Commandes – organes de service – éléments de choix, caractéristiques, dimensions, emplacements, efforts"* [AFNOR, 1999] et cela avec pour rôle de mise en route de la machine de pré-filetage, donc de déclencher la rotation de deux roues - filetés.

Des évolutions ont été apportées par rapport au **réglage du cuir**, car **un système à réglette** a été prévu afin de *faciliter le positionnement du cuir par rapport aux roues filetés*, mais également *pour diriger le cuir et permettre un filetage uniforme.*

En effet, toutes ces modifications sont les résultats de plusieurs **boucles itératives de type " Conception – Evaluation – Validation "**, appliquées au système virtuel Opérateur (H) - Machine de pré-filetage (P) - Environnement de travail (E).

Nous présentons ainsi la version finale du préconcept virtuel retenu pour la machine de pré-filetage et l'activité simulée de filetage future associée (figure III.59).

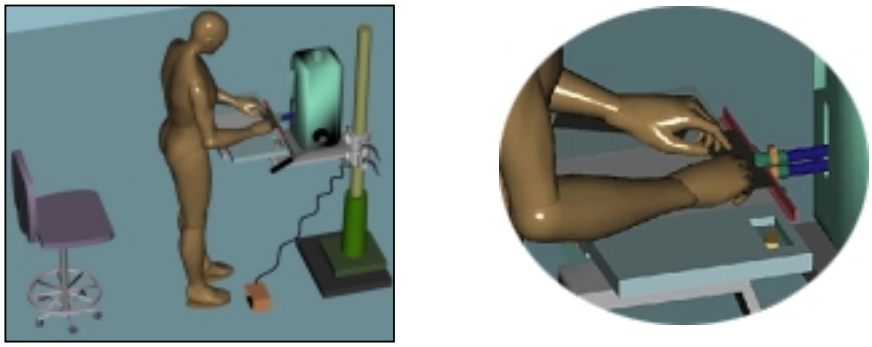


Figure III.59 La simulation de l'activité future de filetage mécanisé (H95)

Plusieurs tâches sont définies pour la réalisation de l'activité future de filetage et elles sont présentées à travers la figure III.60.

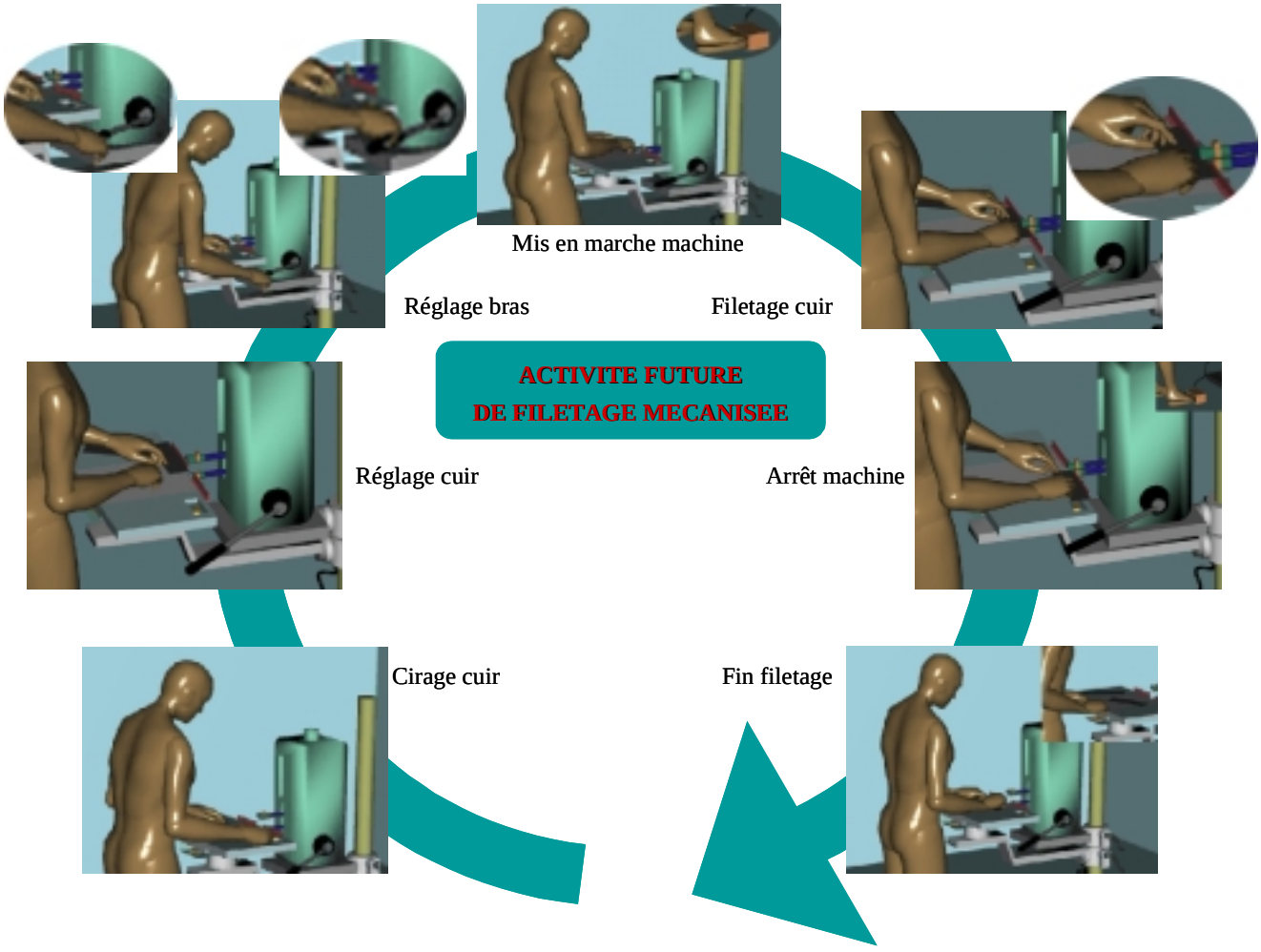


Figure III.60 La décomposition de l'Activité GP Future de filetage mécanisé (H95)

Nous pouvons ainsi mettre en évidence la posture la plus fréquente du futur opérateur qui est "debout et peu penché en avant". Cela a d'ailleurs constitué l'objet d'une étude dans le cadre des évaluations ergonomiques de l'activité simulée future de filetage, qui avait pour rôle de mettre en évidence les avantages et les inconvénients du filetage mécanisé, notamment par rapport à l'outil existant de filetage.

Les scènes 3D réalisées sous 3D Studio Max et les films vidéo résultant ont représenté les supports de ces évaluations. Ainsi, une **première évaluation posturale** de l'activité future de filetage a été réalisée à l'aide de la méthode RULA intégrée sous l'outil MANERCOS (figure III.61).

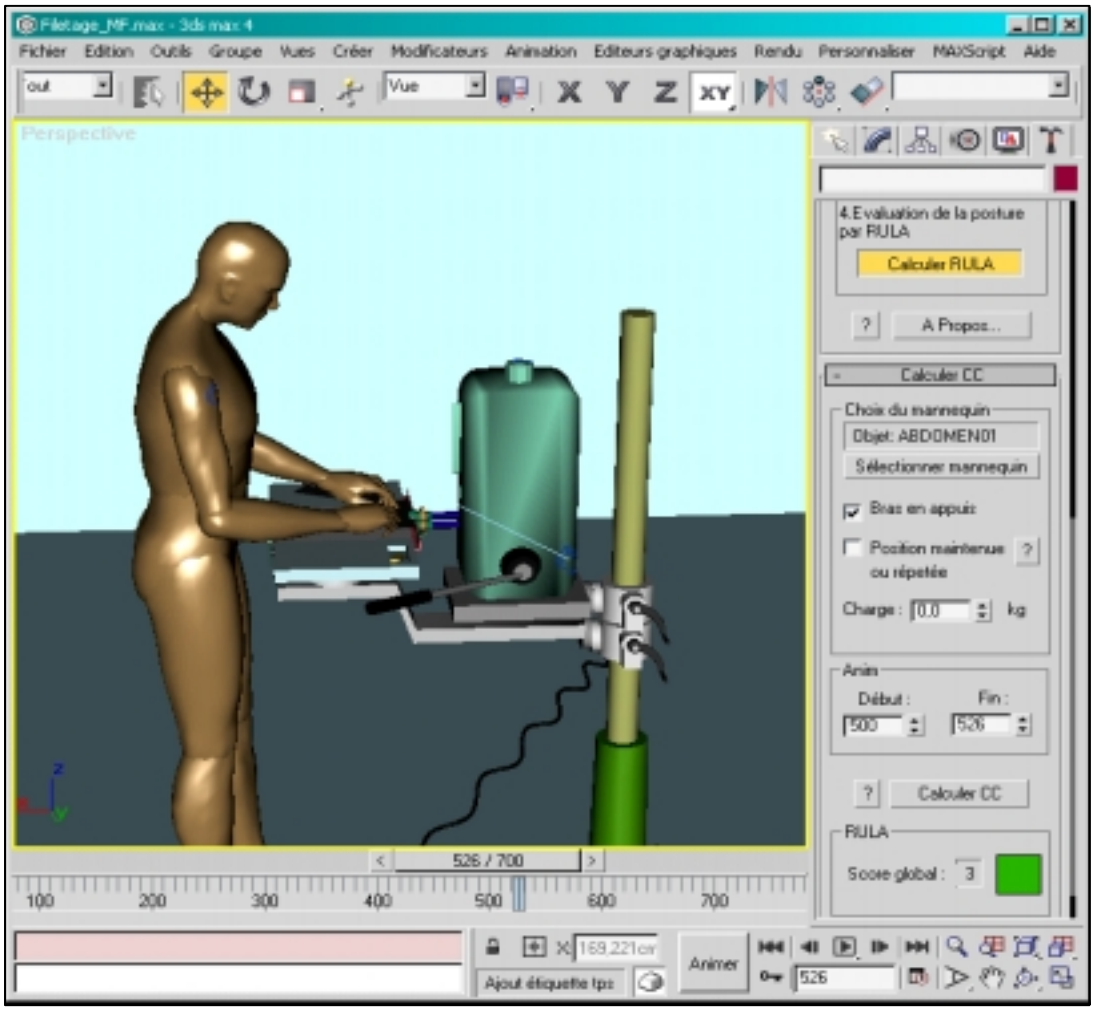
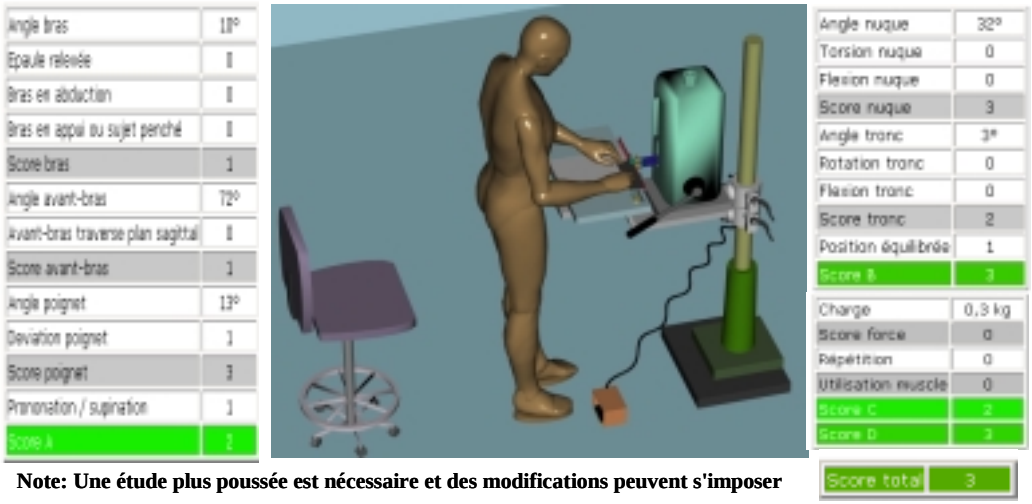


Figure III.61 Scène 3D de l'activité future de filetage mécanisé. Evaluation RULA (H95)

La figure III.62 présente le tableau des scores RULA obtenus lors de l'évaluation d'une posture de filetage.



Note: Une étude plus poussée est nécessaire et des modifications peuvent s'imposer

Figure III.62 Evaluation posturale RULA de l'activité simulée de filetage future (H95)

Le score global 3 obtenu met en évidence **une amélioration significative de l'activité posturale de filetage** car celui-ci est nettement moins élevé que celui de l'activité réelle (initiale) de filetage qui correspondait à 6 ou 7. Il est vrai que celui-ci est un score statique, associé à une posture, ***qui n'est pas la posture représentative de l'activité de filetage***. C'est pour cela q'une évaluation posturale en continu, donc de l'activité totale, a été nécessaire et réalisée à l'aide du même module d'évaluation ergonomique de l'outil MANERCOS. Les résultats sont présentés dans la figure III.63.

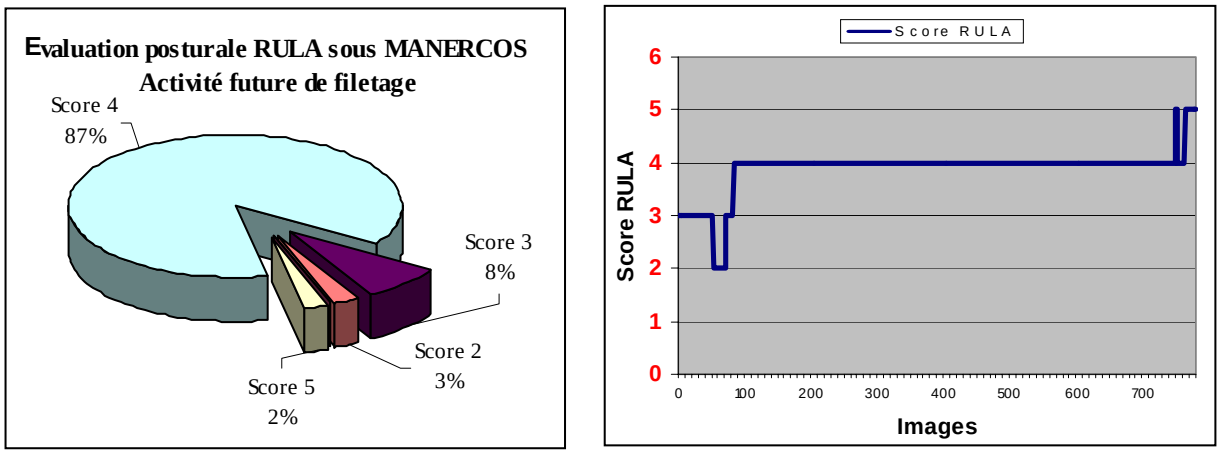


Figure III.63 Répartition et évolution des scores RULA pour la durée totale de l'activité future de filetage (H95)

Ainsi, nous avons constaté que l'activité posturale future de filetage est notée en majorité avec **un score RULA de 4 (87%),** ce qui montre une certaine uniformité du travail. Cependant, 2% de l'activité posturale semble plus contraignante (score RULA 5). Cela correspond à des *activités de réglage ou commande de la machine de pré-filetage, activités qui ne sont pas de longue durée*.

D'autres évaluations ont été réalisées ensuite, notamment celles liées à *l'évaluation du volume d'atteinte et du champ visuel.*

Ainsi, la figure III.64 met en évidence, à travers les deux demi-sphères bleues, **le volume d'atteinte** correspondant au mannequin numérique, donc au futur opérateur. Il est visible dans ce cas que les commandes de la future machine de pré-filetage se trouvent approximativement dans la zone d'atteinte, mais des améliorations à ce niveau restent encore possibles et souhaitables.

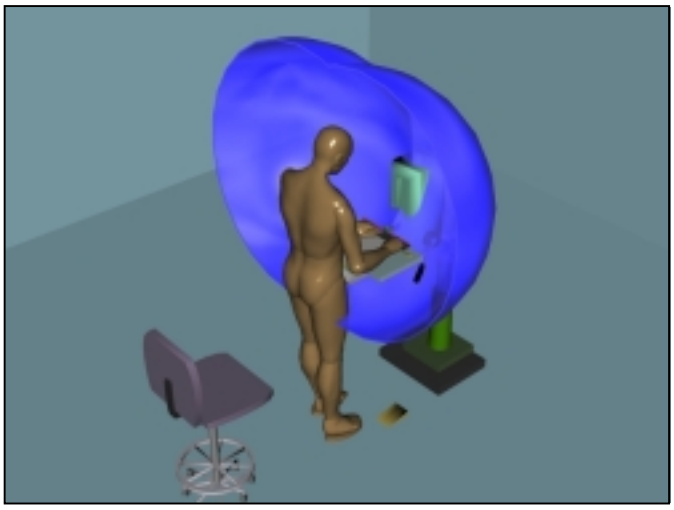


Figure III.64 Evaluation du volume d'atteinte de l'opérateur (H95)

La figure III.65 met en évidence, à travers l'évaluation réalisée au niveau du **champ visuel**, que la visibilité pendant la future activité de filetage est en général correcte.

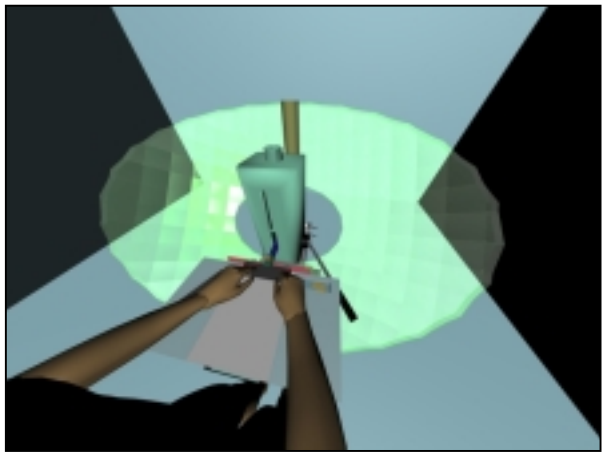


Figure III.65 L'évaluation du champ visuel du futur opérateur pendant la future activité de filetage (H95)

Une remarque s'impose dans ce cas au niveau de la **visibilité au filetage** qui se fait simultanément du côté inférieur du cuir (la machine permet un filetage de deux côtés). Il apparaît nécessaire pour cela de prévoir un miroir permettant la vue en dessous du cuir. Une loupe pourra également être proposée pour

le filetage au dessus, permettant ainsi au futur opérateur une visibilité encore meilleure de l'activité, mais aussi une amélioration de posture au niveau de la nuque.

Il est apparu nécessaire de faire ensuite une **analyse comparative des résultats** obtenus dans ce cas avec ceux obtenus en situation existante de filetage et dans le cas de l'activité future de filetage manuel (préconcepts d'outils à main, pince et scie). Il est évident que le filetage mécanisé futur est la meilleure manière de diminuer la pénibilité posturale lors du filetage du cuir par les opérateurs.

III.3 Conclusions de l'étude

Les expérimentations que nous avons réalisées au sein de l'entreprise LMS nous ont permis de tester et valider notre méthodologie de conception anthropocentrée (figure II .1). Plus précisément, à travers la méthode de simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale (figure II.11) réalisée à l'aide du mannequin numérique MANERCOS (figure II.9), nous avons exposé comment il est possible **de prévenir les Troubles Musculo Squelettiques par une meilleure prise en compte des caractéristiques physiques des opérateurs, très tôt dans la conception de leurs systèmes de travail**. Nous avons montré également qu'une telle méthodologie, intégrant la méthode de simulation évoquée et l'outil correspondant, **favorisent la fédération des acteurs de conception, notamment des concepteurs et des ergonomes.** Tout cela est réalisable **en tenant compte des principes de la conception concourante, donc du respect du triplet "qualité – coûts - délais".**

L'entreprise LMS a été réceptive à ces résultats. Ainsi, les préconcepts proposés – modèles numériques du futur outil à main et de la future machine de pré-filetage – ont suivi les autres étapes du processus de conception. Le groupe GT-LMS a travaillé ensuite sur **l'optimisation de ces propositions et leur matérialisation** afin de proposer un nouvel outil de filetage et une machine de pré-filetage, mieux adaptés aux opérateurs selliers-maroquiniers.
Pour information, nous précisons que *les deux préconcepts, maquettes numériques proposées pour le futur outil de filetage à main*, ont été à la base d'un **troisième pré-concept**, matérialisé par la suite sous forme d'un prototype que nous ne pouvons pas présenter pour de raisons de confidentialité.

A travers ces expérimentations, nous avons constaté également les limites de nos modèles. Celles-ci nous ont permis de proposer de nouvelles voies d'amélioration, à la fois au niveau de la méthodologie de conception, de la méthode de simulation et de l'outil "mannequin numérique". Tous ces aspects seront présentés dans la partie suivante du document.

Quatrième Partie

DISCUSSIONS GENERALES

TABLE DE MATIERES

IVeme partie DISCUSSIONS GENERALES. APPORTS ET LIMITES DE NOTRE TRAVAIL 161

Introduction 161

IV.I Contributions 161

IV.I.1 Contribution de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée 161

IV.I.2 Contribution de la "nouvelle" méthode de simulation de l'Activité GP de l'Humain .. 166

IV.I.3 Contribution de l'outil - mannequin numérique - MANERCOS 166

IV.2 Limites de notre travail de recherche 168

IV.2.1 Limites de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée 168

IV.2.2 Limites de la "nouvelle" méthode de simulation numérique de l'Activité GP de l'Humain 168

IV.2.3 Limites de l'outil MANERCOS 169

IVeme partie DISCUSSIONS GENERALES. APPORTS ET LIMITES DE NOTRE TRAVAIL

"Le but de la discussion ne doit pas être la victoire, mais l'amélioration"

JOSEPH JOUBERT

Introduction

Dans la partie précédente, nous avons présenté l'application de la méthodologie proposée à la conception d'un nouveau système de travail (nouvel outil de filetage et machine de pré-filetage).
Dans cette partie, nous allons exposer, dans un premier temps, les conclusions concernant la faisabilité de la méthodologie proposée, ses avantages, ainsi que la pertinence de l'outil MANERCOS et de la méthode de simulation numérique associée à une telle démarche. Il s'agit pour nous de montrer l'intérêt de cet outil pour améliorer le processus pluridisciplinaire de conception et en particulier pour favoriser la coopération de deux des acteurs participants : l'ergonome et le concepteur.
Dans un deuxième temps, nous allons exposer les limites de la méthodologie de conception proposée, de la méthode de simulation numérique des activités GP de l'Humain présentée, mais également les limites du mannequin numérique MANERCOS, qui nous permettent de définir par la suite les perspectives de notre recherche.

IV.I Contributions

IV.I.1 Contribution de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée

L'application réalisée dans le domaine des systèmes de travail nous a permis de *montrer l'apport de la méthodologie proposée à* ***la prise en compte des capacités et caractéristiques physiques de l'Humain (opérateur)*** *en amont du processus de conception de ces systèmes, encore* ***au stade numérique.***

Contribution d'un point de vue recherche

La méthodologie de conception anthropocentrée proposée traduit une amélioration des modèles de conception ergonomique et/ou d'intervention ergonomique dans la conception, évoqués par la littérature [Duchamp,1988; Aoussat,1990; Roussel,1996; Truchot,1997; Aoussat,1998; Duchamp,1999; Sagot,1999; Garrogou,2001, Marsot,2002; Leborgne,2001; Sagot,2003]. Comme nous avons pu en faire la présentation dans la partie théorique de ce mémoire, ces modèles mettent en évidence deux types d'actions, qui vont dans deux directions opposées : *la démarche ergonomique qui intègre des "activités de conception"* et *la démarche de conception qui intègre des "activités ergonomiques".*

S'inspirant du modèle de l'articulation "Analyse ergonomique - Développement de produits" suggéré par Duchamp [Duchamp,1999] et à l'appui du modèle de conception anthropocentrée défini par Sagot et ses collaborateurs [Sagot et al.,2003], nous avons proposé une méthodologie de conception qui prend en compte les deux types d'actions, dans les deux sens. Cette dernière définit et "formalise" une encore **meilleure relation** entre "les activités de conception" et "les actions ergonomiques", basée sur la **méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales (AGP) de l'Humain à l'aide des mannequins numériques**.

Notre modèle de conception vient ainsi enrichir les "anciens" modèles, favorisant ***encore mieux l'intervention de l'ergonomie, et cela dès le début du processus de conception des produits.*** C'est une amélioration qu'il apporte, en particulier, au modèle proposé par Roussel [Roussel,1996] qui favorise, à travers un Référentiel Commun d'Usage (RCU), la participation de l'ergonomie dans la phase de formulation et proposition de solutions. Par rapport à celui-ci et encore par rapport au modèle défini quelques années plus tard par Leborgne [Leborgne,2001], qui propose l'utilisation d'un RCU "enrichi" dans ***les phases en aval*** **du processus de conception**, notre modèle ***facilite notamment la prise en compte des caractéristiques physiques humaines dans les phases en amont du processus de conception****, à travers* ***la simulation numérique des Activités GP de l'Humain***.
Il s'agit de deux premières phases, c'est-à-dire les **Etudes de Faisabilité et les Etudes Préliminaires,** qui permettent, par exemple, à partir d'une demande d'un produit par des utilisateurs, d'identifier le besoin, de trouver, définir et transformer des idées en pré-concepts, **maquettes numériques** du futur produit, *adaptées aux futurs utilisateurs en terme de santé, sécurité et confort d'usage*. Cela est possible par ***une meilleure intégration de la méthode de simulation numérique des activités physiques de l'Humain*** et par ***une meilleure exploitation des outils de type mannequins numériques, dont MANERCOS.***

Nous nous positionnons ainsi par rapport aux travaux de Gomes [Gomes,1999] qui a proposé *"une première approche de conception centrée sur l'Homme à l'aide de la simulation numérique des activités physiques de l'Humain"* et, en lien étroit, a développé le mannequin numérique MANERCOS. Dans la continuité de ces travaux, nous avons défini **"une nouvelle" méthode de simulation numérique à l'aide de MANERCOS,** en proposant *un modèle encore plus précis, mieux représenté, détaillé, qui s'intègre mieux et encore en amont dans la méthodologie de conception de produits*. Ce sont les expérimentations réalisées qui nous ont permis de mettre en œuvre et valider l'intégration à la conception de cette méthode de simulation et de l'outil associé MANERCOS, mais également de les faire évoluer.

Par une intervention en amont, **la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain** vient compléter la méthodologie de conception anthropocentrée de produits proposée par Zwolinski [Zwolinski,1999] et enrichie ultérieurement par Sagot [Sagot,1999]. Selon ces auteurs **la méthode de simulation réelle des activités physiques de l'humain,** réalisée dans la phase en aval d'Etudes Détaillées, est **un outil d'aide à la conception des produits**. Selon nos travaux**, la méthode de simulation numérique des activités physiques de l'humain,** réalisée dans les phases en amont d'Etudes de Faisabilité et d'Etudes Préliminaires, doit être considérée aussi comme une aide à la conception.

Notre méthodologie de conception ergonomique se positionne entre deux modèles : celui proposé par Garrigou [Garrigou,2001], qui reste très centré sur "le métier d'ergonome", et celui proposé par Marsot [Marsot,2002], qui est centré davantage sur "le métier de concepteur". Nous pouvons même affirmer qu'elle se situe à la frontière de ces deux métiers car elle propose des approches, des méthodes et des outils qui conviennent autant à l'ergonome qu'au concepteur (ex : la méthode de simulation, les mannequins numériques, etc).

C'est une nouvelle manière de concevoir qui **réunit les différents acteurs**, dont **les concepteurs et les ergonomes**, dès le début du processus de conception, ce qui leur **permet d'y intégrer très tôt des contraintes,** tant **techniques, qu'ergonomiques.**

Cette méthodologie constitue une **nouvelle représentation (formalisation) des points de rencontre "ergonomes - concepteurs"** [Carballeda,1997; Daniellou,1997; Aoussat,1998]. L'approche systémique de **type H-P-E** [Gomes,1999; Chitescu,2003a] utilisée permet à ces acteurs de travailler en commun, tout au long du processus de conception de produits *(de grande diffusion ou industriels) pour* ***analyser l'existant*** *et* ***établir le besoin****, pour* ***définir le cahier de charges fonctionnel*** *(Cdcf) du futur produit, pour* ***proposer, définir et évaluer*** *de pré-concepts, pour* ***créer*** *de prototypes et pour* ***réaliser*** *le produit*

final. Grâce à cette approche, ***les utilisateurs*** *deviennent eux-mêmes des acteurs de conception* car ils participent activement, à côté des ergonomes et des concepteurs, à la conception de leur futur produit.

Il convient de rappeler ici que nos commentaires visent par la suite surtout la conception des produits industriels, dont les systèmes de travail. Nous soulignons à cet égard ***le rôle important des Activités Physiques (Gestuelles et Posturales) des opérateurs*** auxquels ces systèmes de travail sont dédiés. Celles-ci représentent ***des réels supports pour la coopération*** de l'ergonome et du concepteur [Gomes,1999]. A l'aide de ces activités, ils participent ensemble à l'analyse d'un **systeme de travail "réel" (HR-PR-ER)** qu'ils transforment après en **système "virtuel" (HV-PV-EV)** et qu'ils font évoluer ensuite, en passant par **un système "réaliste" (HR-PR-EV)**, vers un **système "à nouveau" réel (HR-PR-ER)**, futur système de travail "anthropocentré". Evidemment, les opérateurs sont des participants actifs, à côté des autres acteurs du processus de conception, à la conception de leurs futurs systèmes de travail.

Notre méthodologie favorise **une meilleure articulation de l'ergonomie et de la conception**, qui se construit autour de boucles d'**analyse – conception – évaluation – validation** des activités physiques de l'Humain (Opérateur) et, à travers celles-ci, du futur système de travail destiné à cet opérateur.

Contribution d'un point de vue industriel

Les effets positifs de cette méthodologie sont également perceptibles pour "les utilisateurs" de ces systèmes de travail, **les opérateurs**. En effet, ***leur confort, leur sécurité au travail et leur santé*** sont mieux pris en compte dans la conception de leurs outils et postes de travail.
Cet aspect intéresse l'entreprise et les organismes médicaux car la conception de systèmes de travail adaptés aux opérateurs peut favoriser **la diminution du nombre de cas de Troubles Musculo-Squelettiques** et donc **la réduction des coûts liés aux maladies professionnelles**. Ainsi, l'entreprise peut avoir une meilleure employabilité de son personnel, des personnes vieillissantes et des femmes, et peut devenir de plus en plus performante.

La nouvelle méthodologie montre globalement qu'il est possible de concevoir des produits, dans notre cas des systèmes de travail, adaptés à l'Homme, tout en respectant le triplet "qualité - coûts – délais".

Concrètement, l'application de notre méthodologie à l'étude LMS a permis de proposer plusieurs solutions techniques :

- deux préconcepts (modèles numériques) d'un ***nouvel outil de filetage manuel*** :
  - la pince ;

- la scie.

- un préconcept (maquette numérique) d'une machine de pré-filetage.

Il convient de rappeler qu'un troisième préconcept numérique a été défini pour le nouvel outil de filetage, préconcept qui découle de deux premières, matérialisé par la suite en prototype et ensuite dans la phase de réalisation.

Le nouvel outil de filetage à main a été proposé dans le but de réduire la pénibilité de l'activité de filetage, tout en conservant le geste métier, le caractère artisanal du produit à réaliser, la qualité, Cependant, la machine de pré-filetage proposée a été perçu comme "un poste de travail d'aide" pour les opérateurs, leur permettant de réaliser certaines tâches de pré-filetage, tout en préservant leur santé, leur confort et leur sécurité. En effet, pour des raisons qu'on vient d'évoquer (geste métier, précision, qualité,…), les tâches finales de filetage du produit "à fileter" devront être réalisées avec le nouvel outil de filetage manuel.

Par ailleurs, la conception de ces pré-concepts a été le fruit d'une **collaboration continue des ergonomes et des concepteurs** au sein du groupe projet. **Les opérateurs ont été également impliqués depuis le début de l'étude,** fait qui a facilité l'analyse et la compréhension de leurs insatisfactions au travail et aussitôt la prise en compte de leurs besoins et attentes lors de la conception de leur futur outil et poste de travail, donc du futur système de travail.

Les effets positifs des nouveaux dispositifs (outils de filetage, machine de pré-filetage) ont été mis en évidence par la comparaison des indicateurs caractéristiques aux Activités Gestuelles et Posturales initiales (existantes) et futures.

Ces indicateurs de risque d'apparition des TMS sont élaborés à partir des scores posturaux donnés par la méthode RULA [Mc Atamney and Corlett,1993], des valeurs d'efforts imposés et de répétitivité des gestes et d'autres évaluations ergonomiques (champ visuel, volume d'atteinte).

Le constat final a été que cette méthodologie apporte sa contribution à l'amélioration des conditions de travail par la diminution de la pénibilité physique.

Concernant les aspects liés aux délais de conception, c'est **la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain** et **l'outil de type mannequin numérique MANERCOS**, mieux intégrés à cette méthodologie, qui se montrent déterminantes.

IV.I.2 Contribution de la "nouvelle" méthode de simulation de l'Activité GP de l'Humain

La méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain à l'aide des outils de type mannequins numériques existe, comme déjà évoqué auparavant, depuis longtemps [Gomes,1999; Barthelat,2001; Leborgne,2001; Crosato,2001; Wang,2003].

Notre manière de l'intégrer et de l'utiliser lors de la conception a donné des résultats encourageants, montrant en même temps de possibles améliorations.

La méthode de simulation que nous avons proposée pour notre modèle de conception va dans ce sens, offrant la possibilité ***d'une meilleure considération des caractéristiques humaines, très en amont du processus de conception.*** Son apport relève notamment de ***la réduction des délais et des coûts de conception,*** mais également de ***l'augmentation de la qualité d'usage des produits***.

Notamment, dans notre application LMS, la méthode de simulation a montré son utilité pour la conception de systèmes de travail, à travers ***la transformation de l'Activité Gestuelle et Posturale de l'Humain***. Plus précisément, il *a été possible de concevoir des systèmes de travail adaptés aux futurs opérateurs,* ***par l'évolution de l'Activité GP d'une situation réelle*** *qui était "contraignante" à une* ***situation future acceptable*** *par ceux-ci, en termes de santé, confort et sécurité*.

Il s'agit d'un passage ***"AGP Réelle – AGP Future Souhaitable – AGP Future – AGP Future Acceptable"*** qui a favorisé *une meilleure analyse des besoins des opérateurs*, *leur interprétation sous forme de recommandations* et ensuite de ***critères ergonomiques pour le cahier des charges fonctionnel*** et ***la traduction de ces derniers en fonctionnalités pour les préconcepts***, maquettes numériques de futurs systèmes de travail.

Cela a été possible, comme déjà évoqué, par l'utilisation de l'approche systémique "Homme – Produit - Environnement" que nous avons adoptée pour notre méthodologie de conception, mais également par l'utilisation de l'outil MANERCOS, mannequin numérique le plus adapté à nos objectifs de recherche.

IV.I.3 Contribution de l'outil - mannequin numérique - MANERCOS

Le mannequin numérique MANERCOS est l'outil support de la méthodologie de conception proposée, notamment pour la mise en œuvre de la méthode de simulation numérique de l'Activité Gestuelle et Posturale de l'Humain. Celui-ci ***vient compléter la palette d'outils des acteurs de la conception, dont ergonomes et concepteurs font partie, facilitant leur collaboration et le travail en commun.***

A travers les modèles qu'il utilise, cet outil permet en effet une ***meilleure collaboration au sein du***

groupe projet parce qu'il fait participer aussi les autres acteurs. Ainsi, il facilite ***l'analyse des besoins de conception en terme d'usage*** car il permet ***la reproduction des dimensions de l'Humain***, possible **utilisateur ou opérateur**, et par la suite ***la simulation de l'Activité Gestuelle et Posturale*** de celui-ci lors de l'utilisation/exploitation d'un produit. Il est capable ensuite ***d'évaluer d'un point de vue ergonomique cette activité***, tout en tenant compte *de normes et standards ergonomiques*, et ***de la faire évoluer vers une Activité Gestuelle et Posturale Future Acceptable*** en tenant compte des caractéristiques techniques imposées.

L'application LMS vient confirmer les capacités de cet outil et montre surtout ***une meilleure exploitation du potentiel de celui-ci dans la conception du futur système de travail.***
Nous avons ainsi présenté :

- *sa capacité de reproduire les dimensions anthropométriques* des opérateurs ciblés pour cette étude, soit des hommes et femmes de différentes tailles ;

- *ses possibilités de simulation de l'Activité Gestuelle et Posturale de filetage des opérateurs retenus et cela à partir de films vidéographiques enregistrés* ;

- ses *aptitudes d'évaluation de l'activité GP simulée*, en termes notamment de *confort postural, mais aussi de cadences au travail, champ visuel ;*

- *la façon dont* l'outil MANERCOS a permis ***la transformation de l'Activité GP réelle simulée de filetage des opérateurs en une Activité GP Future Souhaitable de filetage des futurs opérateurs,*** réunissant ainsi les **ergonomes** et les **concepteurs**, mais aussi les **opérateurs** pour la définition du cahier des charges fonctionnel.

L'outil MANERCOS a également joué, notamment pour les concepteurs, **le rôle de traducteur** des critères ergonomiques du cahier des charges fonctionnel, facilitant ensuite leur matérialisation en fonctionnalités pour les préconcepts, maquettes numériques du futur système de travail. Par l'intermédiaire de la simulation de l'Activité Gestuelle et Posturale, il a eu ainsi un rôle de ***guide pour les concepteurs***.

Nous avons montré également, à travers les évaluations ergonomiques des Activités GP Futures, correspondant au travail des futurs opérateurs sur les préconcepts proposés, que MANERCOS est aussi un ***outil d'aide à la décision*** car il a aidé à la sélection des solutions retenues.

Jusqu'ici nous avons présenté les avantages de nos travaux et des modèles proposés. Nous allons maintenant présenter leurs limites.

IV.2 Limites de notre travail de recherche

IV.2.1 Limites de la "nouvelle" méthodologie de conception anthropocentrée

Une première limite de notre travail est ***l'application partielle de la méthodologie de conception proposée***. Pour de raisons liées aux contraintes de l'entreprise (financières et délais), mais également à nos objectifs initiaux de recherche, l'étude a été réalisée jusqu'à la troisième phase de conception, celle correspondant à la phase de réalité virtuelle que nous allons évoquer un peu plus loin dans nos perspectives de recherche.

Une deuxième limite concerne ***le manque de participation à la conception des autres acteurs du processus,*** comme par exemple les responsables de marketing, les designers, … En lien avec la meilleure coopération des acteurs métiers, nos expérimentations ont montré, notamment lors de la conception de la nouvelle machine de pré-filetage, qu'il est possible de formaliser encore mieux la rencontre des ergonomes et des concepteurs, ce qui peut permettre de diminuer encore plus les délais et les coûts de conception.

Par ailleurs, pour généraliser les résultats obtenus lors de l'application de notre méthodologie au cas LMS, il serait intéressant de réaliser plusieurs études en entreprises, c'est-à-dire dans le domaine des produits industriels, mais également d'élargir son application vers le domaine de produits classés "de grande diffusion".

Enfin, des études supplémentaires seront nécessaires pour vérifier mieux encore, voire quantifier l'impact de cette méthodologie sur le triplet "Qualité - Coûts - Délais". Certains aspects, dont par exemple les coûts des outils associés à cela, les coûts et les délais de formation de ceux qui seront amenés à les utiliser, nécessitent d'être également pris en compte.

IV.2.2 Limites de la "nouvelle" méthode de simulation numérique de l'Activité GP de l'Humain

L'intégration de la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales dans le modèle de conception anthropocentrée proposé est liée à l'outil MANERCOS. Son utilisation est conditionnée par cet outil, les autres mannequins numériques ne disposant pas tous des mêmes modules que MANERCOS. Toutefois, la méthode peut être adaptée à ces outils, selon leurs fonctionnalités, aspect que nous n'avons pas traité pendant nos travaux de recherche.

Une des ses limites concerne ***la méthode de dépouillement de l'activité GP réelle à partir de films vidéographiques et ensuite de simulation de cette même activité***, qui est liée à *l'outil MANERCOS*. Nous avons travaillé activement à l'amélioration de MANERCOS et la version de l'outil que nous avons employée initialement est remplacée progressivement par une nouvelle version améliorée à plusieurs niveaux (Annexe A9).

Une autre limite de la méthode de simulation est liée à ***la délimitation du travail spécifique de l'ergonome de celui du concepteur.*** En effet, il apparaît nécessaire de mieux séparer leurs tâches pendant l'application de la méthode. Par exemple, le concepteur doit réaliser la simulation de l'Activité GP, mais c'est l'ergonome qui doit faire l'analyse ergonomique de l'activité simulée et l'expliquer au concepteur.

Enfin, nous avons proposé deux modèles de simulation ***:*** un pour la re-conception d'un produit, l'autre pour la conception d'un produit nouveau.
Nous avons testé le premier, le deuxième étant appliqué partiellement lors de la conception de la machine de pré-filetage. Il serait donc nécessaire de tester notre méthode sur un cas de conception d'un produit nouveau afin de mieux le formaliser.

IV.2.3 Limites de l'outil MANERCOS

L'application de l'outil MANERCOS a mis en évidence, comme déjà évoqué, plusieurs limites et la nécessité de l'améliorer et même de le re-concevoir.
Ainsi, nous avons relevé des limites liées à **la structure cinématique du mannequin anthropométrique** et notamment au nombre réduit de segments corporels, qui n'a autorisé que la reproduction d'un nombre minime de postures et gestes de l'Humain. Cela a rendu dans certains cas difficile, voire impossible, la simulation de l'Activité Gestuelle et Posturale correspondante. C'est pour cela que nous avons travaillé, comme déjà évoqué, sur la proposition d'un nouveau mannequin numérique. Celui-ci composé d'un nouveau squelette et d'une peau, contient actuellement un nombre suffisant de segments corporels et d'articulations (Annexe A9) pour permettre une animation et simulation plus proche de la réalité.

La construction de ce nouveau mannequin a eu évidement des conséquences sur son Module Anthropométrique, qui a évolué également, favorisant la construction des mannequins numériques, donc des modèles de l'Humain, à partir d'un nombre plus important de dimensions anthropométriques.

L'outil MANERCOS a montré des limites liées à la simulation de l'activité GP et s'est relevé être une tâche lourde, nécessitant pour tout utilisateur, ergonome ou concepteur, une bonne maîtrise du logiciel 3D Studio Max. La durée de la simulation s'est révélée pour certains cas élevée. Ces raisons nous ont encouragé à proposer un nouveau Module de Conception de l'activité pour la nouvelle version du MANERCOS (Annexe A9).

L'évaluation ergonomique des maquettes numériques de systèmes de travail, existants ou futurs, a également révélé les limites de MANERCOS. Il s'agit de la difficulté de bien évaluer certains aspects, tels que l'effort et même les postures. Des travaux d'amélioration ont été ainsi proposés, notamment par une meilleure implémentation de certaines méthodes ergonomiques (ex. l'analyse posturale à travers la méthode RULA ; le calcul du métabolisme énergétique), voire l'addition de nouvelles méthodes (ex. la méthode MTM). C'est dans ce sens que le Module d'Evaluation Ergonomique de l'outil MANERCOS a évolué.

Suite à un travail d'expérimentation, d'autres fonctionnalités de l'outil MANERCOS ont évolué, parmi lesquelles on peut citer l'aspect esthétique et l'ergonomie de son interface, mais nous ne les présenterons pas ici (Annexe A9).

CONCLUSIONS

ET

PERSPECTIVES

CONCLUSIONS

Le point de départ de ces travaux de recherche a été lié aux nombreuses difficultés d'usage posées par les produits actuels aux utilisateurs. Plus précisément, les produits classés industriels ont attiré notre attention avec les nombreux problèmes de santé, confort et sécurité des opérateurs lors de leur exploitation, dont les causes semblaient provenir de leur processus de conception.
Nous avons alors étudié ce dernier et à travers **une étude bibliographique nous avons constaté ses manques dus notamment à une mauvaise prise en compte des caractéristiques humaines.** C'est ainsi que **nous avons défini l'hypothèse** *qu'une* "***nouvelle" méthodologie de conception*** *intégrant mieux* ***la méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain****, réalisée à l'aide* ***des mannequins numériques****, pouvait résoudre les "manques" évoqués*. Cette hypothèse a été par la suite **testée et validée lors de l'application des modèles proposés** dans une étude de re-conception, voire conception d'un système de travail, demandée par l'entreprise LMS.

Les limites de cette "nouvelle méthodologie", de la méthode de simulation associée et du mannequin numérique MANERCOS retenu, ont permis l'ouverture de **nouvelles pistes et perspectives** de recherches, que nous évoquons par la suite.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les perspectives de nos travaux de recherche concernent dans un premier temps ***la méthodologie de conception anthropocentrée proposée*** qui peut encore évoluer. Il s'agit de mieux définir, tester et valider la nouvelle phase de Réalité Virtuelle que nous avons présentée dans la deuxième partie de ce rapport. A travers les expérimentations possibles sur une plate-forme de Réalité Virtuelle, les caractéristiques physiques de l'Humain pourront être encore mieux intégrées dans le processus de conception de produits/ systèmes de travail.

Les perspectives de recherches concernent également **l'outil MANERCOS** car d'autres améliorations sont nécessaires en vue de mieux concevoir, simuler et évaluer ergonomiquement les activités physiques de l'Humain. ***Un meilleur couplage*** *entre le mannequin numérique MANERCOS et les méthodes et les outils ergonomiques spécifiques à la première phase d'observation et d'évaluation de l'activité GP réelle*, pourrait favoriser davantage encore la prise en compte des caractéristiques

physiques de l'Humain à la conception. Nous avons déjà apporté des améliorations importantes à ce mannequin (Annexe A9) et il serait intéressant de poursuivre dans cette voie.

En lien étroit, **la méthode de simulation** proposée peut également évoluer, favorisant l'augmentation de la qualité des simulations, mais aussi la diminution du temps de simulation. Elle doit également évoluer vers un guide permettant une meilleure répartition des tâches des acteurs à qui elle s'adresse, c'est-à-dire l'ergonome et le concepteur.

Pour conclure, nous proposons les axes de travail suivants :

- validation de la phase de réalité virtuelle proposée dans notre méthodologie de conception anthropocentrée de produits ; cette phase devrait permettre l'optimisation des pré-concepts, maquettes numériques de futurs produits, proposées dans la phase d'avant (Etudes Préliminaires), afin de mieux les adapter aux futurs utilisateurs, en terme de confort, santé et sécurité d'usage;
- validation de la nouvelle version du mannequin numérique MANERCOS à travers plusieurs applications de re-conception et/ou conception de nouveaux produits ;
- amélioration de l'outil MANERCOS par :
  - un meilleur couplage aux autres outils associés à notre méthodologie de conception (Centrale CAPTIV, Plate-forme de réalité virtuelle) ;
  - une meilleure adaptation des méthodes ergonomiques qu'il intègre, ainsi que l'implémentation d'autres méthodes qui apparaissent nécessaires pour l'évaluation et la prévention des facteurs de risque (postures, efforts, répétitivité, durée de travail,…) de TMS; proposer une méthode ergonomique modulable selon l'étude ;
- étude de l'impact du mannequin numérique MANERCOS et des outils de réalité virtuelle sur les aspects Qualité – Coûts – Délais de la conception de produits;
- étude, adaptation et/ou extension et de la méthode de simulation proposée à d'autres mannequins numériques.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[A]

AFAV (1997) - Qualité en conception. La rencontre Besoin – Produit - Ressources. AFNOR.

AFNOR (1995) - Recueil de Normes Ergonomiques Françaises. Edit. AFNOR, Paris – La Défense, 619 p.

AGGARWAL J.K, CAI Q. (1999) - Human Motion Analysis : A Review, Computer Vision and Image Understanding, CVIU, vol 73, N° 3, pp. 428 – 440.

ALARY-GRALL L. (1999) - Conception & Design. L'ergonomie d'abord. In Industrie N°45, Mars 1999, pp.11-20.

ALAUZET A. (1998) - ADELE : une architecture de tableau noir pour la simulation ergonomique. Thèse de doctorat en Sciences Appliquées. Université Nancy 1, 149p.

ANDREW LIFE M. AND AL. (1990) - Simulation and the user interface, Taylor & Francis Ltd 1990, 270p.

AMALBERTI R. (1997) - La conduite de systèmes à risque. Le travail Humain, 244p.

AMALBERTI R. (1997a) - L'ergonomie: facteur de sécurité et d'innovation. N REE, n°2, Février 1997, pp. 69-75.

AMALBERTI R. et MOSNERON-DUPIN F. (1997b) - Facteurs Humains et Fiabilité. Quelles démarches pratiques ? Editions OCTARES, 136p.

AMALBERTI R. (1998) - Les facteurs humains à l'aube de l'an 2000. Phoebus, 1998, pp. 5-12.

AMELL T. & KUMAR S. (2001) - Work-Related Musckuloskeletal Disorders: Design as a Prevention Strategy. A Review. In Journal of Occupational Rehabilitation, vol. 11, N°4, December, pp.255-265.

APTEL M. et al. (1998) - Ergonomie des outils à main : Problématique et état de l'art. Notes Scientifiques et Techniques. N° 168, INRS, 148 p.

APTEL M., GERLING A., CAIL F. (2000a) - Méthode de prévention des troubles musculo-squelettiques du membre supérieur et outils simples. Document pour le médecin du travail. N° 83, 3e trimestre 2000.

APTEL M. et al. (2000b) – OREGE : un outil simple d'évaluation des facteurs de risqué biomécanique de TMS du membre supérieur, Les Notes Scientifiques et Techniques de l'INRS, CRAM du Nord-Est, Novembre 2000, vol. 196, 122 p.

APTEL M. et al. (2000c) - Prévenir les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur. De la réflexion à l'action. Des repères théoriques, des démarches, des outils…et des hommes. ED 4056, INRS, Paris, 88 p.

APTEL M. et al. (2002) - Les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur liés au travail. In Work-related musculosketal disorders of the upper limb – Joint Bone Spine 2002, vol.69, Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS, pp. 546-555.

AOUSSAT A. (1990) - La pertinence en innovation: nécessité d'une approche plurielle, Thèse Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 1990.

AOUSSAT A. & LE COQ M. (1998) - Méthodes globales de conception de produits, In *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils, sous la direction de Tollenaere,* Editions HERMES, pp. 53-76.

ARNOULD C.(1995) - Pour une meilleure prise en compte de l'ergonomie et du design dans les processus de développement de produits. Thèse de doctorat en Génie des Systèmes Industriels, INPL-ENSGSI, Nancy, 2vol., 500p .

[B]

BADLER N.I. and al. (1993) - Simulating humans: computer graphics animation and control. Oxford University Press, New York, 270p.

BADLER N. (1997) - Virtual Humans for Animation, Ergonomics and Simulation, IEEE Workshop on Non-Rigid and Articulated Motion, Puerto Rico, June 1997.

BANKS J. (1998) - Hadbook of simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. John Wiley & Sons, Inc., 850 p.

BARADAT D. (1999) - TMS: une approche "conduite de projet". Le processus de conception d'un poste de travail dans une entreprise d'ameublement. Mémoire de DESS (Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées d'Ergonomie). Conception des Systèmes de Travail et Santé. Collection Thèses & Mémoires, Université Victor Segalen Bordeaux 2-ISPED, Laboratoire d'Ergonomie des Systèmes Complexes, 234p.

BARTHELAT J. (2001a) - Intérêt des mannequins numériques pour une conception centrée sur l'homme, Mémoire de DEA en Génie des Systèmes Industriels, INPL-ENSGSI, Octobre, Nancy, 88p.

BARTHELAT J., SAGOT J-C, GOMES S. (2001b) - La simulation des activités gestuelles futures souhaitables: intérêt des mannequins numériques pour une conception centrée sur l'homme, 8ème Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Marrakech, Maroc, 5-7 Juillet, 2001.

BASSEREAU J. F. et coll. (1999) - Représentation et intégration des contraintes de conception liées au consommateur final. Congres de mécanique 1999.

BASSEREAU J-F et DUCHAMP R (1995) - Etude critique de la conception de produits, In Concevoir, Inventer, Créer (sous la direction de PROST R.). Editions l'Harmattan. Collection villes et entreprises, Paris, 189-219 p.

BAUER W. et al. (2000) - Virtual human models in product development, pp. 115-120, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany,* 276p.

BEGUIN P. et coll. (1997) - La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir. Collection Colloques, OCTARES Editions, 137p.

BEGUIN P et WEILL-FASSINA A (1997a) - De la simulation des situations de travail à la situation de simulation. In La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir. Collection Colloques, OCTARES Editions, pp.5-28.

BEGUIN P., DARSES F. (1998) - Les concepteurs au travail et la conception des systèmes de travail: Points de vue et débats. In Actes du colloque "Recherche et Ergonomie", Toulouse, février, 1998, pp.32-48.

BEGUIN P. (2004) - L'ergonome, acteur de la conception. In Falzon (2004) - Ergonomie, pp. 375-390.

BEHARELLE D et coll. (1997) - Conception de produits. Approches comparées de la qualité et de l'ergonomie, Congres Génie Industriel – Albi, 11 p.

BELLEMARE M. et al (2001) - L'amélioration des situations de travail pour l'ergonomie participative et la formation. In Relations Industrielles, Vol. 56, N°. 3, pp. 470-490.

BELLEMARE M. et al (2002) - La transformation des situations de travail par une approche participative en ergonomie : une recherche intervention pour la prévention des troubles musculo-squelettiques, Rapport de l'IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail), Mai 2002, 124 p.

BEN-GAL and BUKCHIN J. (2002) - The ergonomic of workstation using virtual manufacturing and response surface methodology. IIE transactions 34, pp. 375-391.

BERNARD A. et TAILLANDIER (1998) - Le prototypage rapide. Editions HERMES, Paris, 1998 p.

BERNARD B. P. (1997) - Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors: A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 591p.

BERNARD F. (2000) - La communication précoce avec les concepteurs. Congres SELF, pp.484-496.

BERTIN et al. (1998) - La simplicité d'usage. Concepts et éléments de prospective technologique. Ministère de l'Economie et des Finances. Ed. Paris, 78 p.

BIQUAND S. et coll (2000) - L'intervention ergonomique et la contextualisation de l'action. Congres SELF,pp. 44-55.

BLANCO E. (1998) - L'émergence du produit dans la conception distribuée. Vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques. Thèse de doctorat en Génie Industriel – Génie Mécanique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 200p.

BLONDAZ L. (1999) - Prise en compte de la fabricabilité, en conception intégrée de produits mécaniques. Thèse de doctorat en Génie Industriel – Génie Mécanique, Université Joseph Fourier Grenoble 1 – Sciences & Géographie, 172p.

BONNARDEL N. (1992) - Le rôle de l'évaluation dans les activités de conception. Thèse en Psychologie Cognitive. 250 p.

BOCQUET J-C. (1998) - Ingénierie simultanée, conception intégrée, In Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.), Editions HERMES, pp. 29-53.

BOLY V. (2004) - Ingénierie de l'Innovation. Organisation et méthodologies des entreprises innovantes, Editions Lavoisier, Hermes Science Publications,192 p.

BOSSARD P. et coll.(1997) - Ingénierie Concourante. De la technique au social. Collection Gestion. Série : Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Ed .ECONOMICA, Paris, 166 p.

BOUJUT J-F et coll. (1998) - Les "entités de coopération" dans les nouvelles organisations de la conception. Performances Humaines et Techniques. Sept - Oct., nr 96, pp.38-44.

BOUJUT J-F. (2001) - Instrumenter la coopération en conception: exemple d'un outil de synthèse de points de vues en phase amont des projets. Les Actes du 10eme ATELIER DU TRAVAIL HUMAIN. Modéliser les activités coopératives de conception (Coord. F.Darses) INRIA Rocquencourt, 27-28 juin 2001, Paris, pp.111-128.

BOURGEOIS F. et coll. (2000) - Troubles musculo-squelettiques et Travail. Quand la santé interroge l'organisation. Collection Outils et Méthodes. ANACT ,Lyon, 252 p.

BOURGEOIS J-P (1995) - Gestion de projet. Techniques de l'Ingénieur. Traité L'Entreprise industrielle, T 7 7000-1, pp.1-19.

BRANDT D. and al.(2001) - The Design of Human - Centered Manufacturing Systems. CRC Press LLC, 56p.

BRANGIER E. et BARCENILLA J. (2003) - Concevoir un produit facile à utiliser. Editions d'Organisation, 262 p.

BRICAULT E. (1999) - Prévenir les TMS: de l'impensable au possible. Démarches d'entreprises. Les cahiers de l'ANACT, N° 14, 70 p.

BRIME – EUROSYN DEVELOPPEMENT (1997) - L'ingénierie centrée sur l'homme ou la prise en compte des facteurs humains dès les premières phases de la conception. Document réalisé avec l'appui et le financement du Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications. Direction Générale des Stratégies Industrielles, Service de la Technologie et de la Stratégie, 138p.

BROBERG O. (1997) - Integrating ergonomics into the product development process, International Journal of Industrial Ergonomics, No. 19, pp. 317-327.

BROCAS S. (1997) - L'ingénierie centrée sur l'homme. Cahier d'industries, pp.11-20.

BUAUD A. et coll. (2000) - Contribution d'une analyse qualitative et d'une analyse d'activité dans la conception de produits nouveaux. ACTES du 7-ème Séminaire CONFERE sur l'Innovation et la Conception de Produis, 5-7 juillet 2000, pp. 61-68.

BUCKLE P. W. and DEVEREUX J. J. (2002) - The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. Applied Ergonomics 33, Issue 3, pp. 207-217.

BURDEA G. et COIFFET P. (1993) - La réalité virtuelle. Hermes Paris, 402 p.

BURNS C. M. and al. (2000) - A participant-observer study of ergonomics in engineering design : how constraints drive design process. In Applied Ergonomics 31 (2000), pp. 73-82.

BUTI L. B. (1998) - L'Ergonomie du produit. In International Journal of Design and Innovation Research, Vol. 1, n° 1, pp. 21-34.

[C]

CAIL F., APTEL M. et FRANCHI P. (2000) - Les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur. Guide pour les préventeurs. INRS, Paris, 64p.

CALVEZ J-P (1990) - Spécification et conception des systèmes. Une méthodologie, Collection MIM, 632p.

CALVEZ J-P (1990) - Spécification et conception des systèmes. Etudes de cas, Editions Masson, Paris.

CARBALLEDA G., BEGUIN P., GARRIGOU A. et JACKSON M. (1997) - Gestion de l'intervention: interactions et construction de l'action dans les processus de conception industriels. In Performances Humaines & Techniques, Septembre 1997, N° HS, pp. 68-71.

CASE K., PORTER M. et al. (1990) - SAMMIE: a man and workplace modelling system, in: Karwowski et al (Eds). Computer-aided Ergonomics, Taylor & Francis, London, 1990, pp.31-56.

CASE K., PORTER M. et al. (2001) - Virtual fitting trials in "design for all". In Journal of Materials Processing Technology 117, pp. 255-261.

CAZAMIAN P. et al. (1996) - Traité d'ergonomie. Octares Editions, Toulouse.

CHAPANIS A.(1995) - Ergonomics in product development: a personal view. In Ergonomics vol. 38 n°.8, pp. 1625-1638.

CHAFFIN Don B. (2001) - Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design. Society of Automotive Engineers, Inc Warrendale, 184p.

CHEDMAIL P and col. (2002) - Etat de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle. In Mécanique & Industrie 3, pp. 147-152.

CHEVALLIER J. (1989) - Produits et analyse de la valeur. Cépaduès - Editions, Toulouse, 184 p.

CHEVRIAU S., GRUN C., CHITESCU C. et GOMES S. (2003) - Re-conception d'un mannequin numérique pour l'analyse et la conception de l'activité gestuelle, posturale et visuelle. 10eme Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Belfort, France, 3-4 juillet, 9p.

CHITESCU C., GALLAND S., GOMES S. et SAGOT J-C. (2003a) - Virtual Reality within a Human-centered Design Methodology.5th International Conference on Virtual Reality, Laval, 13-18 Mai, 6 p.

CHITESCU C., SAGOT J-C et GOMES S. (2003b) – Favoriser l'articulation "ergonomie-conception de produits" à l'aide de mannequins numériques. 10eme Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Belfort, France, 3-4 juillet, 10p.

CHRISTMANSSON M. and RONNANG M. (2003) - Hur utvecklas produktionssystem I svensk tillverkningsindustri, Rapport fran delprojekt A I Datormanikinprojektet, Arbetslivsrapport – ISSN 1401-2928, Arbetslivsinstitutet Vast, Goteborg, 30 p.

CICCOTELLI J. (1997) - Vers de machines et systèmes plus sûrs. Quelques perspectives de recherche et développement. Cahier de Notes Documentaires – CND – Hygiène et sécurité du travail 166, 1er trimestre, pp.189-199.

COLOMBINI D. (1998) - An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs, Ergonomics, vol. 41, N° 9, pp. 1261 – 1289.

COURQUIN C. (1992) - Contribution à la maîtrise de la diffusion d'une innovation technologique. Proposition d'une méthode intégrée de conception et de lancement de procédés et produits nouveaux. Thèse INPL – GSI.

CROSATO M. (2001) - Integrating ergonomics in the design process of car interiors. With an emphasis on using human simulation tools. Master Thesis. Division of Ergonomics and Aerosol Techology. Departement od Design Science. Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, 100p.

[D]

DALPONT J.P. (1999) - L'entreprise industrielle. Techniques de l'Ingénieur, AG 10-1,p.1-18 .

DANIELLOU F. et NAEL M. (1995) - Ergonomie, In Traité de Genie Industriel - L'Entreprise Industrielle, Techniques de l'Ingénieur T 3 100, Paris, p. 1-24.

DANIELLOU F. et JACKSON M. (1997) - L'ergonome intervient dans et sur des situations de gestion. In Performances Humaines & Techniques, Septembre 1997, N° HS, p.16-20.

DAS B. et SENGUPTA A. (1995) - Computer – aided human modelling programs for workstation design, Ergonomics, vol. 38, n°. 9, pp. 1958 – 1972.

DECOSTER F. (1982) - Données anthropométriques générales. Annexe 1. Université de Technologie de Compiègne, 48 p.

DECREUSE C. & FESCHOTTE D. (1990) - Ingénierie simultanée. Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Industriel, A 5 310, pp.1-14.

DEJEAN P-H. (1992) - L'ergonomie du produit. In Performances Humaines et Techniques, mars - avril 1992, N° 57, pp. 8-19.

DEJEAN P-H. (1994) - Du concepteur au produit : approche ergonomique. In Organisation de la conception-ZREIK K. et TROUSSE B., EUROPIA, pp. 115-124.

DE MONTMOLLIN M. (1995) - Ergonomie. In M. de Montmollin (Ed.), Vocabulaire de l'ergonomie. Edit. Octares, Toulouse, 256p.

DE MONTMOLLIN M. (1998) - Y a-t-il réellement des différences entre l'ergonomie "anglophone" et l'ergonomie "francophone"? – In Dessaigne M-F., Gaillard I. (Coord.), Des évolutions en ergonomie…, Collection Colloques, Editions OCTARES, Toulouse, pp.29-37.

DENEUX D. (2002) - Méthodes et modèles pour la conception concourante. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 119 p.

DENIS D., St-Vincent, M. et al. (2005) - Les pratiques d'intervention portant sur la prévention des troubles musculo-squelettiques : un bilan critique de la littérature. Bilans de connaissances / Rapport B-066, 2005, 81 pages.

DESSAIGNE M-F. et coll. (1998) - Des évolutions en ergonomie. Collection Colloques, OCTARES Editions, Toulouse 254p.

DE TERSSAC G. & FRIEDBERG E. (1996) - Coopération et Conception. Collection Travail, OCTARES Editions, Toulouse, 330p.

DORE R., FICHER X. et al. (2003) - Méthodologie avancée pour la conception conforme utilisateur, AIP PRIMECA, La Plagne 31 mars-2avril 2003, pp. 37-46.

DRAGHICI G. (1998) - Production compétitive basée sur l'ingénierie intégrée, *Les Cahiers des Enseignements Francophones en Roumanie, Service Culturel de l'Ambassade de France en Roumanie,* Bucarest, 21 p.

DUCHAMP R. (1988) - La conception des produits nouveaux. Editions Hermes. Paris. 60p.

DUCHAMP R. (1999) - Méthodes de conception de produits nouveaux. HERMES Science Publications. Paris. 192 p.

DURIEUX F. (2000) - Management de l'innovation. Une approche évolutionniste. Editions VUIBERT et Fondation Nationale pour l'Enseignement de la Gestion des Entreprises, Paris, 176 p.

[E]

EVANS E. (1989) - Simulation in the developement of user interfaces. Ergonomics 32, Vol. 11, pp. 1537-1538.

[F]

FADIER E. (1998a) - L'intégration des facteurs humains à la conception. Travaux actuels et perspectives de recherches. Phoebus - la revue de la sûreté de fonctionnement- numéro special-1998.

FADIER E. et NEBOIT M. (1998b) - Essai d'intégration de l'analyse ergonomique de l'activité dans l'analyse de la fiabilité opérationnelle pour la conception : approche méthodologique, Actes du colloque "Recherche et Ergonomie", Toulouse, février 1998, pp 61-66.

FADIER E. (2003) - Special issue of Safety Science on Safety in Design, Safety Science 41, pp. 89-93.

FADIER E., NEBOIT M. et CICCOTELLI J. (2004) - Intégration des conditions d'usage dans la conception des systèmes de travail pour la prévention des risques professionnels. Bilan de la thématique 1988-2002,INRS, Notes scientifiques et techniques, NS 237, 40p.

FALZON P. (1995) - Les activités de conception: réflexions introductives. Performances Humaines & Techniques Janvier - Février 1995 n° 74, pp. 7-11.

FALZON P. (1996) - Des objectifs de l'ergonomie. pp. 233-242.

FALZON P. (1998) - Qu'est-ce que la recherche en Ergonomie? In Actes des Journées "Recherche et Ergonomie" - Toulouse - février 1998, pp 216-221.

FALZON P. (2004) - Ergonomie. Presses Universitaires de France. 680 p.

FEYEN R. et LIU Y. (2000) - Computer – aided ergonomics: a case study of incorporating ergonomics analyses into workplace design, Applied Ergonomics, vol. 31, pp. 291 – 300.

FISCHER X.et coll (2002) - La réalité virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur, VIRTUAL CONCEPT 2002 – ACTES DU COLLOQUE du 9 et 10 octobre 2002, BIARRITZ – France, pp.80-89.

FILIPPI G et coll. (1995)
Analyse de l'activité et coopération des acteurs de la conception. In Relations Industriels, 1995, vol.50, n. 4.

FLICHY P. (1995) - L'innovation technique. Récents développements en sciences sociales. Vers une nouvelle théorie de l'innovation. EDITIONS LA DECOUVERTE , Paris.

FUCHS P. et al. (2004) - Le traite de la réalité virtuelle. Presses de l'Ecole des mines de Paris, Paris, 570p.

FUCHS P. et RICHIR S. (2003) – Réalité virtuelle et conception. Principes et applications. Techniques de l'Ingénieur, Traité de l'Entreprise Industrielle, AG 2 520 -2, 10 p.

[G]

GAILLARD I. et coll. (2000) - La communication inter métiers et la conduite des projets: quelles nouvelles données pour le s ergonomes?, Congres SELF, pp. 254-263.

GALLIZIO M. and SEMBENINI G. (2002) - Accessibility and maintainability studies through digital humans in a digital mock-up context. ICAS`2002 CONGRESS, pp.883.1- 883.10.

GATE J-C (1998) - Design de A à Z, Paris, 1998, pp.118 – 120.

GARRIGOU A. (1992) - Les apports des confrontations d'orientations socio-cognitives au sein de processus de conception participatifs : le rôle de l'ergonomie, Thèse de doctorat, Conservatoire national des Arts et métiers, Paris.

GARRIGOU A. (1995) - La compréhension de l'activité des concepteurs : un enjeu essentiel pour les ergonomes. Performances Humaines&Techniques, Janvier - Février 1995, n° 74, pp.12-21.

GARRIGOU A. (1995b) - Activity analysis in participatory design and analysis of participatory design activity. International Journal of Industrial Ergonomics, vol15, pp.311-327.

GARRIGOU A. et coll. (1998) - Une démarche de simulation des activités futures au sein des projets de conception. Performances Humaines et Techniques. Nov - Dec., nr 97, pp. 30-39.

GARRIGOU A. et coll. (2001) - Contributions et démarche de l'ergonomie dans le processus de conception. PISTES – Réflexion sur la pratique, vol. 3, N. 2, Octobre 2001, 19 p.

GARRO O. (1997) - Contribution à la modélisation de la conception des systèmes mécaniques. Mémoire d'Habilitation à Diriger Des Recherches, Grenoble, 1997, 83p.

GAUTIER R. (1995) - Qualité en conception de produits nouveaux. Proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information. Thèse de doctorat, Génie Industriel, ENSAM, Paris, 224 p.

GIDEL T. (1999) - La maîtrise des risques par la conduite effective du processus décisionnel dans les projets de conception de produits nouveaux. Thèse de doctorat, Génie Industriel, ENSAM, Paris, 187 p.

GOMES S., SAGOT J.C. (1996) - Intervention ergonomique dans la conception d'un poste de conduite automobile. En Intervenir par l'ergonomie. XXXIeme Congres de la Société d'ergonomie de Langue Française, 11-13 septembre 1996, Bruxelles, Belgique.

GOMES S. (1999) - Contribution de l'analyse de l'activité au processus de conception de produits innovants. Application à la conception de systèmes de contrôle - commande automobiles. Thèse de doctorat, Génie Industriel, INPL, ENSGSI, Nancy, 221p.

GOMES S., SAGOT J.-C., LEBORGNE C. et BARBIER J.-M. (2000) - Conception de la fonction d'usage du produit à partir des activités gestuelles : utilisation de mannequins anthropométriques, Journée spécialisée "Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits", INRETS, Lyon, France, 16 mars.

GOMES S. et SAGOT J-C (2001) - Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme. Contribution des documents numériques. Documents Numériques, Vol 5, N° 3-4, pp.135-154.

GREIL H. et Jurgens H. (2000) - Variability of dimensions and proportions in adults or how to use classic anthropometry in man modeling, pp. 7-27, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany, 276 p.*

GRENIER B. (1989) - Analyse du produit, Techniques de l'Ingénieur, T 50-2, pp. 1-10.

GRENIER B. (1989) - Méthodologie du développement industriel d'un produit, Techniques de l'Ingénieur, T 100-1, pp. 1-16.

GROSJEAN J. C. et col. (2000) - Ergonomie et prévention en conception des situations de travail. Cahier de notes documentaires – Hygiene et securite du travail – N° 179, 2e trimestre 2000, pp. 31-48.

GUANGYAN Li and BUCKLE P. (1999) - Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. Ergonomics, vol. 42, no. 5, pp. 647-695.

GUERIN F., LAVILLE A., DANIELLOU F. et al (2001) - Comprendre le travail pour le transformer: la pratique de l'ergonomie, Editions de l'ANACT,Lyon, 288p.

GUIDAT de QUEIROZ C. (1990) - Document de synthèse pour la présentation de l'Habilitation à Diriger des Recherches, INPL, UFR Génie des Systèmes Industriels, Nancy, 1990, 85p.

GUIDAT C., BREAS M., LOUIS D. (1995) - Faire de la formation un outil de renouveau du service public. La productivité dans un monde sans frontières. Edit. de l'Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 885 – 893.

GUIDAT C. (1997) - Sciences de l'innovation. Positionnement de la discipline. Orientation de développement. Dossier M.S.T., ENSGSI-INPL, Nancy, 32p.

[H]

HAEHNSEN E. et KANN E. (1997) - Les nouvelles voies de la CAO. In Industrie N°28, Juin 1997, pp.11-22.

HARANI Y. (1997) - Capitalisation du savoir-faire des concepteurs à des fins de réutilisation. Deuxième Congres International Franco-Quebecois de Génie Industriel - ALBI 1997, pp. 1-15.

HARICHAUX P. et LIBERT J.P. (2003) - ERGONOMIE ET PRÉVENTION DES RISQUES PROFESSIONNELS. Tome 2 - Les contraintes musculo-squelettiques et leur prévention. CHIRON Editeur, Paris,176 p.

HASAN R., BERNARD A., CICCOTELLI J. (2002) - Proposition d'une nouvelle approche de conception par l'intégration du concept de situation de travail. IDMME 2002, Clermont-Ferrand, France, May 14-16 2002, 10p.

HENDRICK H. W. (1997) - Macroergonomics: a proposed approach for use with anthropotechnology and ergonomic work analysis in effecting technology transfer. Le travail humain, Tome 60, n° 3 / 1997, pp. 255-272 .

HESS J. A. and all.(2004) - A participatory ergonomics intervention to reduce risk factors for low-back disorders in concrete laborers. Applied Ergonomics, Vol.35, pp.427-441.

HESKETT et al. (2000) - Product Management, CRC Press LLC, 90p, http://www.egnetbase.com

HOC J-M (2000) - From human - machine interaction to human- machine cooperation. Ergonomics, vol. 43 n° 7, pp. 833-843.

[I]

IMBEAU D. (2003) – Facteurs de risque et évaluation des troubles musculo-squelettiques de l'épaule. Le Médecin du Québec, Vol. 38, Numéro 2, février 2003, pp. 111-114.

[J]

JAIN SANJAY (1999) - Simulation in the next millennium; Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp.1478-1484.

JAULENT P. (1994) - Génie logiciel des méthodes SADT, SA, E-A, SA-RT, SYS-P-O, OOD, HOOD….,Armand Colin Editeur.

JEANTET A. (1998a) - Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception. Sociologie du travail n° 3, pp. 291-316.

JEANTET A. et BOUJOUT J.F (1998b) - Approche sociotechniques des processus de conception. In Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.), Editions HERMES pp.115-138

[K]

KARWOWSKI W. and al. (1990) - Computer-Aided Ergonomics: A Researchers Guide, Taylor and Francis.

KARWOWSKI W. and al. (1997) - Human Factors in Manufacturing, In Handbook of Human Factors and Ergonomics by Salvendy G(Ed), 2nd edition, pp.1865-1925.

KEMENY A. (2000) - Simulation and Perception of Movement, In Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, September 2000, pp.13-22.

KEMMLERT K. (1995) - A method assigned for the identification of ergonomic hazards - PLIBEL, Applied Ergonomics, vol. 26, pp. 199 – 211.

KERGELEN A. (1986) - L'observation systématique en ergonomie: élaboration d'un logiciel d'aide au recueil et à l'analyse des données. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ergonomiste, CNAM, 67p.

KINETIX (2000) - 3D Studio MAX version 4.0 – Manuel d'utilisation.

KOLSKI C. (1997) - Interfaces homme -machine, applications aux systèmes industriels complexes, Editions HERMES, Paris, 1997, 478p.

KUORINKA I. (1998) - The influence of industrial trends on work-related musculoskeletal disorders (WMSDs). In International Journal of Industrial Ergonomics 21, pp.5-9.

[L]

LANCIANO C., MAURICE M., SILVESTRE J-J et NOHARA H. (Eds) (1998) - Les acteurs de l'innovation et l'entreprise. France – Europe - Japon. Editions l'Harmattan, Paris, 272 p.

LANDAU K. (Ed) (2000) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany, 276 p.

LAPRIE J.C. (1996) - Guide de la sûreté de fonctionnement. CEPADUES EDITIONS, Toulouse, Janvier 1996, 369p.

LARING J., FORSMAN M., KADEFORS R. and ÖRTENGREN R. (2002) - MTM - based ergonomic workload analysis. International Journal of Industrial Ergonomics, 30, pp. 135-148.

LASSERRE L. Et coll. (1997) - Vers une démarche de validation ergonomique en milieu simulé. Performances Humaines et Techniques. Nov - Dec., nr 97, pp. 23-29.

LAUREILLARD P. et coll. (1997) - Conception intégrée et entités de coopération. 01 Design '97, 19 p.

LEBORGNE C. (2001) - Proposition d'une démarche anthropocentrée de conception de produits nouveaux basée sur l'usage et destinée à une meilleure intégration, par ergonome, des besoins et des attentes des usagers. Application dans le secteur du mobilier de cuisine. Thèse de doctorat, ENSAM, 230p.

LEDOUX E. (1995) - La conception architecturale: qui sont les concepteurs?, In Performances Humaines & Techniques; Janvier - Février 1995 n° 74, pp. 22-25.

LEE M. W. (2000) - New paradigm, new market and new theatre in ergonomics. Ergonomics, vol. 43 n°. 7, pp.975-982.

LIBERT J.P. (2003) - Conception du poste de travail. In HARICHAUX P. et LIBERT J.P. - ERGONOMIE ET PRÉVENTION DES RISQUES PROFESSIONNELS. Tome 2 - Les contraintes musculo-squelettiques et leur prévention. CHIRON Editeur,Paris, pp. 143-165.

LIU X., ZHUANG Y., PAN Y. (1999) - Video Based Human Animation Technique, Institute of Artificial Intelligence, The seventh ACM Multimedia Conference, 30 october – 5 november 1999, Orlando, Florida, USA.

LISSANDRE M. (1990) - Maîtriser SADT. Editeur Armand Colin, Paris, 220 p.

LOUHEVAARA V. and SUURNAKKI T. (1992) - OWAS : A method for the evaluation of postural load during work. Training publication. Institute of Occupational Health, Centre for Occupational Safety, Helsinki, Finland.

[M]

MACREDIE R. et coll. (1996) - Virtual reality and simulation: an overview. Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, pp. 669-674.

MALCHAIRE J. (2001a) - Evaluation et prévention des risques lombaires: classification des méthodes. Médecine du travail & Ergonomie. Volume XXXVIII, n° 2, pp. 53-66.

MALCHAIRE J. (2001b) - Stratégie de prévention collective des risques musculo-squelettiques (TMS). Médecine du travail & Ergonomie. Volume XXXVIII, n° 4, pp. 147-156.

MALCHAIRE J. et al (2001c) - Troubles musculo-squelettiques des poignets. Influence directe ou indirecte des facteurs psychologiques et organisationnels., Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail – N° 185, 4eme trimestre 2001, INRS, ND 2158, pp.23-34.

MALINE J. (1994) - Simuler le travail, une aide à la conception de projet. Edition ANACT, 156p.

MALINE J. (1997) - Simuler pour approcher la réalité des conditions de réalisation du travail: la gestion d'un paradoxe. In La simulation en ergonomie: connaître, agir, interagir (Beguin P. et al), Toulouse, Octares Editions, 138p.

MARACH A. et BUBB H. (2000) - Development of a force-dependent posture prediction model for the CAD human model RAMSIS, pp. 105-113, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany,* 276p.

MARSOT J. (2002) - Conception et Ergonomie. Méthodes et Outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à main. Note scientifique et technique n° 219. INRS, 69p.

MARSOT J. et CLAUDON L. (2004) - Design and Ergonomics. Methods for Integrating Ergonomics at Hand Tool Design Stage. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE),Vol. 10,N°.1, pp.13-23.

MARSOT J. (2005) - QFD: a methodological tool for integration of ergonomics at the design stage. Applied Ergonomics, N° 36, pp.185-192.

MARTY C. et LINARES J-M (1999) - Industrialisation des produits mécaniques. Vol 1. Conception et Industrialisation. HERMES Science, 378 p.

MC ATAMNEY L. and CORLETT E.N. (1993) - Rapid upper limb assessment (RULA) : A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics, 24, 2, pp. 91-99.

MER S., JEANTET A. et TICHKIEWITCH (1997) - L'activité de conception dans l'entreprise: Quelques repères. Deuxième Congrès International Franco-Quebécois de Génie Industriel, 14p.

MER S. (1998) - Le monde et les outils de la conception. Pour une approche socio-technique de la conception de produit, Thèse de doctorat, Génie Industriel – Génie Mécanique, INPG, , Grenoble, 230 p.

MERLLIE D. et PAOLI P. (2001) - Les conditions de travail en Europe: L'enquête 2001, Performances n° 1, Novembre – Décembre 2001, pp.23-29.

MICHEL M. (1999) - Tendances : Innover en gérant la connaissance. Lettre de l'AF Micado, Avril 1999.

MILLOT P. et col. (1999) - Coopération Homme-Machine : Problématique et méthodologies de mise en oeuvre. Université de Valenciennes -BP 311.

MONOD H. et KAPITANIAK (2003) - Ergonomie. Editions Masson, Paris, 288 p.

MONSEF Y. (1996) - Modélisation et simulation des systèmes complexes. Concepts, Méthodes et outils. Technique & Documentation, 1996.

MONTREUIL S., BELLEMARE M. et coll. (2004) - L'implication des acteurs dans l'implantation de projets d'amélioration des situations de travail en ergonomie participative: des constats différenciés dans deux usines. Revue PISTES, Vol.6, N°. 2, Novembre 2004, 12p.

MOREL L. (1998) - Proposition d'une ingénierie intégrée de l'innovation vue comme un processus permanent de création de valeur. Thèse INPL – LRGSI.

[N]

NGASSA A. et TRUCHOT P. (1999) - Transfert d'une méthodologie de conception de produit dans une PME., In 14eme Congres Français de Mécanique, Toulouse, 7p.

NGASSA A. et coll. (2000) - Intégration de nouvelles ressources dans l'entreprise pour innover. Problématique de cette intégration. Application à la méthode TRIZ et à la veille technologique, In Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, 2000.

NICOLET J-L. et coll. (1990) - Catastrophes ? Non merci ! La prévention des risques technologiques et humaines. Collection LE NOUVEL ORDRE ECONOMIQUE. Edit. Masson, Paris, 1990.

NIGEL CORLETT E. (2001) - The evaluation of posture and its effects, p. 662-713, In Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology (Wilson J.R. Ed), Second Edition, Taylor & Francis Ltd, 1136p.

NOULIN, M (1992) - Ergonomie. TECHNIPLUS Editions, 200 p.

NOULIN, M (1995) - L'analyse de l'activité : connaissance, compréhension, rencontre… Séminaire DESUP/DESS de Paris I, Performances Humaines & Techniques, Septembre 1995,N° Hors Serie, 7-10 p.

NRC (1988) - Ergonomic Models of Anthropometry, Human Biomechanics and Operator – Equipment Interfaces : Proceedings of a Workshop, Committee on Human Factors, National research Council, 116p, 1988.

[O]

OCCHIPINTI E. (1998) - OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs, Ergonomics, vol. 41, N° 9, pp. 1290 – 1311.

OLENDORF M.R. and DRURY C. G. (2001) - Postural discomfort and perceived exertion in standardized box-holding postures – Ergonomics, 2001, Vol.44, N. 15, pp.1341 – 1367.

OREL T. et ZREIK K. (1992) - Conception : quelques repères historiques. Revue Sciences et Techniques de la conception, volume 1-n° 1/ 1992, pp. 7-20.

[P]

PAHL G. and BEITZ W. (1999) - Engineering Design - A Systematic Approach. Springer - Verlag London Limited 1999, 546 p.

PARKES A. and al. (1993) - DRIVING FUTURE VEHICLES. Taylor & Francis Ltd, London and Washington, DC, 460 p.

PEACOCK B. and al. (1993) - AUTOMOTIVE ERGONOMICS. Taylor & Francis Ltd, London and Washington, 1993, 490 p.

PERRIN J. (2001) - Concevoir l'innovation industrielle. Méthodologie de conception de l'innovation. CNRS Editions,Paris, 2001, 166 p.

PHEASANT S. T (1996) - Bodyspace : Anthropometry, Ergonomics, and the Design of Work. Taylor&Francis Ltd, 244p.

PHEASANT S. T (2001) - Anthhropometry and the design of workspaces, p. 557-573, In Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology (Wilson J.R. Ed), Second Edition, Taylor & Francis Ltd, 1136p.

PIERREVAL H. (1990) - Les méthodes d'analyse et de conception des systèmes de production. HERMES, Paris, 1990.

PIETTE A., COCK N., MALCHAIRE J. (2001) - Pathologies musculo-squelettiques des membres supérieurs: épidémiologie et prévention, MEDECINE DU TRAVAIL & ERGONOMIE, volume XXXVIII, N° 2, pp.91-94

POMIAN J-L et coll. (1997) - INGENIERIE & ERGONOMIE. Eléments d'ergonomie à l'usage des projets industriels. Cépaduès - Editions, Toulouse, 260p.

PORCHER et NEDEL L. (1998) - Simulating Virtual Humain. SIBGRAPI'98, Rio de Janeiro, octobre 1998,152p.

PORTER J. M. and al. (2004) - Beyond Jack and Jill: designing for individuals using HADRIAN. In International Journal of Industrial Ergonomics 33, pp. 249-264.

PORTER J. and al (2001) - Computer-aided ergonomics and workplace design, p. 574-620, In Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology (Wilson J.R. Ed), Second Edition, Taylor & Francis Ltd, 1136p.

PORTER J. M. and al. (1993) - Computer-aided ergonomics design of automobiles. p. 43-47. In Peacock and Karwowski, AUTOMOTIVE ERGONOMICS. Taylor & Francis Ltd, London and Washington, 1993, 490 p.

POTTIER A. et NEBOIT M. (1995) - L'analyse ergonomique du travail par l'étude de l'exploration visuelle - OCTARES Editions, Toulouse, 1995, 164p

PROST R. (1995) - Concevoir, Inventer, Créer – Editions l'Harmattan - Collection villes et entreprises, Paris, 338p

PUNNETT L. and WEGMAN D.H. (2004) - Work-Related musculoskeletal disorders : the epidemiologic evidence and the debate, In Journal of Electromyography and Kinesiology 14, 13-23 p.

[Q]

QUARANTE D. (1994) - Eléments de design industriel. POLYTECHNICA, Paris, 645p.

[R]

RABARDEL P. et coll. (1995) - LES HOMMES & LES TECHNOLOGIES. Approche cognitive des instruments contemporains, Armand Colin Editeur, Paris, 240p.

RABARDEL P. et coll. (1998) - ERGONOMIE – CONCEPTS ET METHODES. Octares Editions, Toulouse, 178p.

RAHIMI M. and KARWOWSKI W. (2000) - Safety and Human Factors. In Teechnology Management Handbook. (Ed. DORF R.C.), CRC Presse LLC, 23p.

REBIFFE R., GUILLIEN J. and PASQUET P. (1982) - Enquête anthropométrique sur les conducteurs français. Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'association Peugeot-Renault. 1981-1982, 234p.

RENAUDEAU F. (2002) - L'évolution de la conception. Conférences MICAD 2002.

RICHARD P. (1997) - La Maîtrise d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'ergonome. Journée de Bordeaux sur la pratique de l'ergonomie 19 - 21 Mars 1997 Performances Humaines & Techniques Juillet - Août 1997, 55-59 p.

RICHIR S. et al (1997) - Influence des outils d'Imagerie de Synthèse et de Réalité Virtuelle sur le processus de conception des produits industriels. Deuxième Congres International Franco – Québécois, Albi, 5p.

RIEDEL O.H., BREINING R., SCHARM H.R. (1997) - How to use Virtual Environments for Engineering Projects,17p., http://vr.iao.fhg.de/vr/information/Publications/SIGGRAPH97 .

RIOT A. et coll. (2000) - Constitution d'une structure dédiée à l'innovation. ACTES du 7-ème Séminaire CONFERE sur l'Innovation et la Conception de Produis, 5-7 juillet 2000.

ROMON F. (1998) - Stratégie de l'entreprise et gestion des projets innovants. Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Industriel, A 5 020, 18 p.

ROQUELAURE Y. and al. (2003) - Facteurs de risque professionnels du syndrome du tunnel radial chez les salariés de l'industrie de production de masse. Chirurgie de la main 22, pp.293-298.

ROSENBAUM R.B and OCHOA J.L. (1993) - Carpal Tunnel Syndrome and Other Disorders of the Median Nerve. Butterworth-Heinemann, a division of Reed Publishing,USA, 358 p.

ROUSSEL B. (1996) - ERGONOMIE EN CONCEPTION DE PRODUITS. Proposition d'une méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques dans le processus de conception de produits. Thèse de doctorat, Génie Mécanique - Génie Industriel, ENSAM, Paris, 244p.

ROUSSEL B. et LE COQ M. (1997) - La coopération en conception de produits. La place de l'ergonome au sein d'un processus interdisciplinaire, Revue Performances Humaines & Techniques, N° Hors Série, Séminaire Paris1, pp.21-24.

ROUSSEL B. (1999) - La coopération en conception de produits. La place de l'ergonome au sein d'un processus interdisciplinaire. 14e Congres Français de Mécanique, TOULOUSE.

RUEF B. (1995) -Essais d'usage des produits grand public. Techniques de l'Ingénieur, T 3 200.

RUITER I. A. (2000) - Anthropometric man-models, handle with care, pp. 94-99, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany*, 276 p.

[S]

SAGOT J-C. (1996a) - Pour améliorer simultanément moyens de production et conditions de travail: l'ERGONOMIE. La Technique Moderne, N° 6-7, pp. 7-12.

SAGOT J-C. et ZWOLINSKI, P. (1996b) - Re-conception ergonomique d'un atelier de décompte. XXXIème Congres de la SELF (Société d'ergonomie de Langue Française), Tome 1, Bruxelles, Belgique, pp. 238-246.

SAGOT J.C. et GOMES S. (1996c) - Prise en compte du facteur humain dans la conception des commandes et dispositifs informationnels d'une poste de conduite automobile futur. Cahier de charges ergonomique, IPSE-LPI,1996.

SAGOT J.C., GOMES S. et ZWOLINSKI P. (1998) - Vers une ergonomie de conception: gage de sécurité et d'innovation. International Journal of Design and Innovation Research, Vol. 1, Nr. 2, November 1998, pp.22-35.

SAGOT J.C, GOMES S. (1998) - Pour une meilleure prise en compte de l'Homme dans la conception des systèmes de travail. Approche ergonomique. Phoebus – la revue de la sûreté de fonctionnement, numéro spécial, pp. 23-31.

SAGOT J.C. (1999) - Ergonomie et conception anthropocentrée. Document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, 1999, 267p.

SAGOT J.C. (2000) - Ergonomie et conception centrée sur l'homme:exemple de l'étude de la conception du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Journée Ergonomie et Facteurs Humains dans le transport ferroviaire – Toulouse. Pp. 88-203.

SAGOT J.C. (2002) - L'opérateur : réel acteur dans la démarche de conception. Actes de la Conférence ERGO-IA . L'Homme et les Nouvelles Technologies De l'Information et de la Communication. Usages et Usagers, 8-1à octobre, Biaritz, pp.109-125.

SAGOT J.-C., GOUIN V. & GOMES S. (2003) - Ergonomics in product design: safety factor. Safety Science, Volume 41, Issues 2-3, pp.137-154.

SALAU I. (1995) - La conception distribuée : théorie et méthodologie. Université Henri Poincaré Nancy I, Thèse de doctorat en production automatisée, Nancy, 128 p.

SCHRAGE D. P. (1993) - Concurrent Design: A Case Study. Concurrent Engineering : Automation, Tools and Techniques, John Wiley & Sons, Inc, pp.535-581.

SCHWACH V. (1995) - Conception de produits : aspects psychosociologiques. Techniques de l'Ingénieur, Traité L'Entreprise Industrielle, T 4 000, pp. 1-17.

SENGUPTA A. K. et DAS B. (1997) - Human: An Autocad based three dimensional anthropometric human model for workstation design, International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 19, pp. 345 – 352.

SEITZ T. and coll. (2000) - Anthropometry and measurement of posture and motion. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 25, pp. 447-453.

SEITZ T. et Bubb H. (2000) - Anthropometry and measurement of posture and motion, pp. 28-36, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany,* 276 p.

SENACH B. (1990) - Evaluation ergonomique des interfaces Homme-Machine : une revue de la littérature. Rapports de Recherche. No. 1180. INRIA. Centre de Sophia Antipolis. Février 1990, 74p.

SHANNON R. E. (1998) - Introduction to the art and science of simulation. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 7-14 p.

SHIKDAR A. A. and SAWAQED N. M. (2003) - Worker productivity, and occupational health and safety issues in selected industries and science of simulation. In Computer & Industrial Engineering, 10 p.

SIMONEAU S. (1996) - Work-Related Musculoskeletal Disorders (WMSDs) : A better understanding for more effective prevention. Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail. Secteur fabrication de produits en métal et des produits électriques. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec, 58p.

SPERANDIO J.C. (1996) - L'ergonomie face aux changements technologiques et organisationnels du travail humain. Edit. Octares, Toulouse, 1996, 438p.

SPITZER H. et HETTINGER TH. (1965) - Tables donnant la dépense énergétiques en calories pour le travail physique - L'étude du travail.

STEVEN MOORE J. et coll. (2001) - Validity of Generic Risk Factors and the Strain Index for Predicting Nontraumatic Distal Upper Extremity Morbidity, In American Industrial Hygiene Association Journal, vol. 62, March / Avril, pp. 229 – 235.

ST-VINCENT M. et coll. (2000) - Démarche d'ergonomie participative pour réduire les risques de troubles musculo-squelettiques: bilan et réflexions. Revue PISTES, Vol.2, N°. 1, Mai 2000, 33p.

STRAJESCU E. et CHITESCU C. (1999) - ERGONOMIA SI ESTETICA MASINILOR-UNELTE, Note de cours, Universitatea POLITEHNICA din Bucuresti, pp.15 – 18.

[T]

TARZIA A. et EYNARD E. (2000) - The anthropometric design of 3D virtual manikins, pp. 62-71, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany,* 276 p.

TESSIER Y. (2000) - Vers de mannequins numériques intégrés dans la conception de produits. Journée spécialisée "Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits", INRETS, Lyon, France, 16 mars.

THALMANN D. (1999) - The Role of Virtual Humans in Virtual Environment Technology and Interfaces, In Proceedings of Joint EC-NSF Advanced Research Workshop, Bonas, France.

THEUREAU J. et PINSKY L. (1984) - Paradoxe de l'ergonomie de conception. Revue des conditions de travail, n° 9, pp. 25-31.

THEUREAU J. (2002) - Quels seront :devront être les ergonomes du futur ? : L'idée de l'ergonomie & Les tendances socio-techniques. Conférence in Colloque SELF " La formation des ergonomes en question", 6 Nov., Carré des Sciences, Paris.

THIBAULT J. F. (1998) - Instrumenter les simulations. Performances Humaines et Techniques. Nov - Dec., nr 97, pp.14 – 22.

THOMAS P. and MACREDIE R. (2002) - Introduction to the New Usability. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 9, No. 2, June 2002, pp. 69-73.

THOUVENIN E. (2002) - Modélisation des processus de conception de produits et développement de la capacité d'innovation : Application au cas des PME-PMI. Thèse de doctorat, Génie Industriel, ENSAM - Paris, 129 p.

THOUVENIN E. and MILLET D.(2002) - Innovation by integration of new trades: use of system approach.

TICHKEWITCH S et coll. (1993) – Ingénierie simultanée dans la conception de produits. Compte rendu des Universités d'été du pôle productique Rhône-Alpes,…..

TICHKIEWITCH S. (1998) - Ingénierie simultanée, ingénierie concourante : le point de vue du chercheur, in Actes du colloque L'Ingénierie simultanée, Pôle régional de Conception et d'INNOVATION, Belfort, 11-12 Mars, Volume 2, pp.1-6.

TICHKEWITCH S. (1998) - Les enjeux des nouvelles techniques de conception, In Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.), Editions HERMES, pp. 19-27.

TIGER H. et MILLET D. (1998) - Conception pour l'environnement : inventer de nouveaux outils et de nouveaux systèmes d'action, In Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils (sous la direction de Tollenaere M.), Editions HERMES, pp. 219-245.

TOLLENAERE M. (1998) - Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils. Editions HERMES, 576 p.

TRUCHOT P. et coll (1997) - L'approche pluridisciplinaire de la conception de produits: une science de l'innovation. Deuxieme Congres International Franco - Quebecois de Genie Industriel - ALBI 1997, 11 p.

[V]

VASTA P. J. and KONDRASKE G. V (2000) - Human Performance Engineering: Computer-Based Design and Analysis Tools. In The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition. Bronzino J. D. (Ed). CRC Press LLC, 2000.

VEDDER J. (1998) - Identifying postural hazards with a video-based occurrence sampling method – International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 22, pp. 373 – 380.

VERRIEST J.-P. (2000) - Les mannequins numériques dans la conception de produits. Journée spécialisée "Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits", INRETS, Lyon, France, 16 mars.

VEZEAU S. (2004) - Apports des utilisateurs et méthodes d'investigation de l'activité dans un processus de design d'outils manuels: *De la parole au geste du plâtrier*. Thèse de doctorat. Ecole Pratique des Hautes Etudes. Sciences de la Vie et de la Terre, 336 p.

[W]

WANG X. and al. (2003) - Apport d'enquêtes de terrain puis d'une simulation 3D par mannequin numérique pour l'aménagement spatial d'un poste de conduite de grue portuaire à conteneurs. Recherche Transport Sécurité 78, pp. 43-61.

WATERS T. R. and al. (1993) - Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. Ergonomics, vol. 36, n°7, pp. 749-776.

WESTGAARD R. H. (2000) - Work-related musculoskeletal complaints: some ergonomics challenges upon the start of a new century, Applied Ergonomics, Volume 31, Issue 6, pp. 569-580.
WILSON J. R (2000) - Fundamentals of ergonomics in theory and practice. Applied Ergonomics 31, pp. 557-567.

WILSON J. R and NIGEL CORLETT E. (Ed) (2001a) - Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology, Second Edition, Taylor & Francis Ltd 1136 p.

WILSON J. R (2001b) - A framework and a context for ergonomics methodology, p. 1-39, In Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology (Wilson J.R. Ed), Second Edition, Taylor & Francis Ltd,1136 p.

WISNER A. (1995) - Understanding problem building: ergonomic work analysis, In Ergonomics vol.38, N°.3, Taylor & Francis Ltd, pp. 595 – 605.

WOLFER B. (2000) - Man modeling and human movement simulatin in 3D-development trends and prospects for application in ergonomics, pp. 100-104, In *Landau (2000) (Ed) - Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design. A review of recent developments in human modeling and other design aids. Verlag ERGON GmbH, Stuttgart, Germany,* 276p.

[Y]

YANNOU B. (2001) - Préconception de produits. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Mécanique, Ecole Centrale, Paris, 184 p.

[Z]

ZACHARY W. and al. (2001) - The application of human modeling technology to the design, evaluation and operation of complex systems. In Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research, Volume 1, Elsevier Science Ltd., p. 199-247.

ZREIK K. et TROUSSE B. (1994) - Organisation de la conception. EUROPIA, Paris, France, 318p.

ZWOLINSKI P. (1999) - La simulation de l'activité comme outil d'aide à la conception et à l'innovation. Application à la conception du poste de conduite des TGV futurs. INPL, ENSGSI, Nancy, 294p.

****

APACT (1991) - Guide d'évaluation des conditions et organisations du travail. Association de la Prévention et de l'Amélioration des Conditions de Travail, Ed. APACT, Paris, 35 p.

CSPRP (2004) - Conseil Supérieur de la Prévention des Risques Professionnels (2004) – Dossier de presse, 2004, 44 p.

CESTP – ARACT (2002) - Démarche d'évaluation et de prévention de risques professionnels. Points de repère pour une intervention courte en entreprise. CESTP ARACT Picardie et l'ARACT Nord-Pas-de-Calais, Ed. ANACT, 135 p.

DELMIA (2000a) - ENVISION/ERGO ™ – ERGONOMICS, 2p., www.delmia.com

DELMIA (2000b) - SAFEWORK PRO – ERGONOMICS, 8p., www.delmia.com

EDS (2002) - Designing safer, ergonomically sound workplaces, products and processes. E-factory Ergonomics. Electronic Data Systems Corporation, 12p.

ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS (.....) - Ergonomie ; Innovation, Innovation technologique, Simulation. Articles en ligne.

MASTS (2004) - Le travail en France. Santé et sécurité 2002-2003. Actions. Perspectives. Chiffres clés. Editions Liaisons, Ministère des Affaires Sociales, du Travail et de la Solidarité, 176p.

NRCIM (2001) - Musculoskeletal Disorders and the Workplace: Low Back and Upper Extremities. Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace. Commission on Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: National Academy Press, National Research Council and the Institute of Medicine.

N. I. O. S. H. (1997) - Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors: A critical review of epidemiologique evidence for work – related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, an low back, U. S. Department of healt and human services, National Institute for Occupational Safety and Health.

Norme NFX 35-104 - "Postures et dimensions pour l'homme au travail sur machines et appareils". AFNOR, Paris 1983, 11p.

ABREVIATIONS

- AGP – Activité Gestuelle et Posturale
- AGPF – Activité Gestuelle et Posturale Future
- AGPFA – Activité Gestuelle et Posturale Future Acceptable
- AGPFS – Activité Gestuelle et Posturale Future Souhaitable
- ANTHROPOS – Mannequin numérique développé par la firme IST, Germanie
- APACT - Guide d'évaluation des conditions et organisations du travail. Association de la Prévention et de l'Amélioration des Conditions de Travail
- AutoCad – Logiciel de modélisation 2D et 3D - www.autodesk.fr/
- CAO – Conception Assistée par Ordinateur
- CATIA V5 R10 – Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application, outil de CAO developé par Dassault Systems
- CdCf - Cahier de Charges fonctionnel
- CGP - Comportements Gestuels et Posturaux
- ENSGSI – Ecole Nationale Supérieure de Génie de Systèmes Industriels
- ERCOS – équipe de recherche en ERgonomie et COnception de Systèmes
- ERPI – Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs
- HTLM – Hyper Text Mark-up Language
- H - P - E – système Homme - Produit - Environnement
- IGES – Initial Graphics Exchange Spécification – Format graphique pour la CAO
- INPL – Institut National Polytechnique de Lorraine

- MANERCOS – Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes
- MP – Maladies Professionnelles
- MTM – Method -Time Measurement
- NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health
- OWAS - Ovako Working position Analysing System
- ProEngineer – Logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) - www.ptc.com
- RULA – Rapid Upper Limb Analysis – méthode d'évaluation posturale des membres supérieures
- RV – Réalité virtuelle
- SADT – Structured Analysis and Design Technique
- SeT – laboratoire de Systèmes et Transport
- SolidWorks – Logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) - www.solidworks.fr
- STL - Stéréolitographie
- TMS – Troubles Musculo-Squelettiques
- UTBM – Université de Technologie de Belfort – Montbéliard
- XAO – Désigne tout ce que l'on peut faire en étant assisté par un ordinateur (AO), dans toutes sortes de domaines et pour appliquer toutes sortes de techniques
- WRMDS - Work-Related Musckuloskeletal Disorders
- VRML - Virtual Reality Modeling Language

LISTE DE FIGURES

Ière partie

Figure I.1 Evolution des MP et des TMS en France [source CSPRP, 2004].....25
Figure I.2 Facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS)[d'après Cail et al.,2000].....27
Figure I.3 Lien "Cycle de vie – Conception" d'un produit [d'après Quarante,1994] 30
Figure I.4 Evolution du cycle de vie du produit [Sources: Lissandre,1990; Ciccotelli,1997; Pomian,1997; Marsot, 2002].....32
Figure I.5 Conception de produits - Carrefour de disciplines [d'après Aoussat,1998].....34
Figure I.6 Le processus de conception rétroactif et coopératif de produits [d'après Sagot,1999].....38
Figure I.7 La démarche ergonomique qui articule trois approches [Source: Garrigou,2001].....41
Figure I.8 Méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques [d'après Roussel,1996].....43
Figure I.9 Méthodologie de conception intégrant l'ergonomie [Marsot,2002].....44
Figure I.10 L'intervention ergonomique dans la conception de produits [Source: Sagot ,2003].....48
Figure I.11 Processus de développement ergonomique [d'après Laprie,1996].....49
Figure I.12 Articulation de l'analyse ergonomique avec le processus de conception [Source: Duchamp,1988].....54
Figure I.13 Positionnement de notre recherche par rapport à la littérature 56
Figure I.14 Hypothèses de recherche 60

IIème partie

Figure II.1 Méthodologie de conception centrée sur l'Homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception" [Chitescu et col.,2003a]..... 66
Figure II.2 ENVISION / ERGO [Chrismansson,2003] 72
Figure II.3 JACK [EDS,2002]..... 72
Figure II.4 RAMSIS [Christmansson,2003]..... 72
Figure II.5 SAFEWORK PRO [Delmia,2000b]..... 72
Figure II.6 SAMMIE [Case,2001] 73
Figure II.7 VIRTUAL ANTHROPOS [Riedel,1997]..... 73
Figure II.8 Démarche générale d'utilisation des mannequins numériques dans la conception de produits 75
Figure II.9 MANERCOS - Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes..... 77
Figure II.10 Evaluations ergonomiques possibles à travers les mannequins numériques..... 84
Figure II.11 Démarche de conception anthropocentrée pour de nouveaux produits industriels qui s'appuie sur l'outil MANERCOS 90
Figure II.12 Transformation des Activités Gestuelles et Posturales de l'Humain.....91
Figure II.13 Démarche de conception anthropocentrée pour de produits industriels nouveaux qui s'appuie sur l'outil MANERCOS.....92

IIIème partie

Figure III.1 L'évolution de TMS chez LMS pendant la période 1996-2002 97
Figure III.2. Présentation de l'opération de filetage 98
Figure III.3 L'outil à main "Fer à fileter" 99
Figure III.4 Système de travail corépondant à l'opération de filetage 99
Figure III.5 Les étapes de l'intervention du groupe GT-ERCOS 101
Figure III.6 Description de la première phase de l'intervention GT-ERCOS 104
Figure III.7 Description de la deuxième phase de l'intervention GT-ERCOS 105
Figure III.8 Population ciblée 107
Figure III.9 Courbe de Gauss 107
Figure III.10 Banc d'observation vidéographique 108
Figure III.11 Plate-forme de mesure CAPTIV. Evaluation de l'activité GP Réelle de filetage (sujet H95) 109
Figure III.12 Films vidéographiques enregistrés pour l'activité réelle de filetage (Sujet F5) 110
Figure III.13 Description de la séquence de travail de filetage [Rabardel,1998] 110
Figure III.14 Protocole d'observation de l'activité réelle de filetage (Sujet H 95) 111
Figure III.15 Relevé d'observation de l'activité réelle de filetage (Sujet H95) 111
Figure III.16 Répartition des tâches dans la durée totale de l'activité de filetage (Sujet H95) 112
Figure III.17 Répartition Taches - Postures dans la durée totale de l'activité de filetage (Sujet H95) 113
Figure III.18 Chronogramme "Tâche - Posture " (Sujet Homme 95) 113
Figure III.19 Evaluation posturale RULA de l'activité de filetage (Sujet Homme 95) 114
Figure III.20 Les mouvements possibles du poignet [Source : Cail,2000] 116
Figure III.21 Analyse simultanée "action-angles-effort" à l'aide de CAPTIV Light 2001 (sujet H95) 117
Figure III.22 Variation du pourcentage de la FMV pendant l'activité de filetage (Sujet H95) 118
Figure III.23 Répartition du pourcentage de la FMV durant le temps total de filetage (Sujet H95) 119
Figure III.24 L'évolution du pourcentage de la FMV durant le temps total de filetage (Sujet F5) 119
Figure III.25 Evolution des angles de "flexion - extension" au niveau de l'avant-bras (Sujet H95) 120
Figure III.26 Angles de flexion/extension au niveau de l'avant-bras (sujet H95) 121
Figure III.27 Angles de "flexion/extension" au niveau du poignet (Sujet H95) 121
Figure III.28 Angles de "abduction/adduction" au niveau du poignet 122
Figure III.29 Synthèse des analyses CAPTIV de l'activité de filetage 123
Figure III.30 Les composants du cahier des charges fonctionnel 125
Figure III. 31 Dépouillement de l'activité de filetage (sujet H95) 126
Figure III.32 Scène 3D de modélisation numérique du poste de filetage (H95) 127
Figure III.33 Simulation virtuelle des Activités Gestuelle et Posturale Réelle de filetage à l'aide du mannequin numérique MANERCOS (sujet H95) 128
Figure III.34 Simulation virtuelle des Activités Gestuelle et Posturale Réelle de filetage à l'aide du mannequin numérique MANERCOS (sujet F5) 129
Figure III.35 Interface VRML représentant l'Activité Gestuelle et Posturale Simulée de filetage (sujet F5) 129
Figure III.36 Evaluation RULA sous MANERCOS de l'activité simulée de filetage (H95) 131
Figure III.37 Evaluation posturale RULA de l'activité simulée de filetage (sujet F5) 132
Figure III.38 Répartition des scores RULA pour la durée totale de l'activité simulée de filetage (sujets H95 et F5) 133
Figure III.39 Evolution du score RULA dans le temps. Corrélation "Score – Image (Posture)" pour l'activité de filetage (Sujet H95) 134
Figure III.40 Evaluation du volume de confort et de l'atteinte pour le poste de filetage (H95) 136
Figure III.41 Evaluation du champ visuel pour le poste de filetage (Sujet H95) 137

Figure III.42 Evaluation du volume de confort et de l'atteinte pour le poste de filetage (F5)..... 137
Figure III.43 Posture de travail imposée par le champ visuel (Sujet F5)..... 138
Figure III.44 Définition des Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables à l'aide de l'outil MANERCOS..... 140
Figure III.45 Définition et simulation de certaines Activités Gestuelles et Posturales Futures Souhaitables à l'aide du mannequin numérique MANERCOS 141
Figure III.46 Le rôle des activités GPFS dans la définition du CdCf et la proposition des préconcepts 142
Figure III.47 Préconcepts d'outil à main proposés à l'appui des activités FS de filetage (a-Pince; b - Scie) ……..... 143
Figure III.48 Premier préconcept de la machine de pré-filetage 145
Figure III.49 Principe de fonctionnement de la machine de pré-filetage proposée 145
Figure III.50 De la simulation des AGPFS à la simulation des AGPF de filetage. Filetage à scie…… 146
Figure III.51 Analyse de l'activité de filetage avec la pince..... 147
Figure III.52 Analyse comparative des postures simulées de "filetage réel – filetage à pince"..... 147
Figure III.53 Evaluation de l'activité posturale de filetage à la pince (H95)..... 148
Figure III.54 La simulation de l'activité de filetage à "la scie" (H95)..... 149
Figure III.55 Scène 3D représentant l'évaluation posturale RULA de l'opérateur (H95)..... 150
Figure III.56 Répartition des scores RULA dans la durée totale de l'activité simulée (H95) 150
Figure III.57 L'analyse comparative des préconcepts d'outil à main proposés..... 151
Figure III.58 L'évolution du préconcept proposée pour la machine de pré-filetage (H95)..... 153
Figure III.59 La simulation de l'activité future de filetage mécanisé (H95)..... 154
Figure III.60 La décomposition de l'activité future de filetage mécanisé (H95)..... 154
Figure III.61 Scène 3D de l'activité future de filetage mécanisé. Evaluation RULA (H95) 155
Figure III.62 Evaluation posturale RULA de l'activité simulée de filetage future (H95)..... 156
Figure III.63 Répartition et évolution des scores RULA pour la durée totale de l'activité future de filetage (H95)…..... 156
Figure III.64 Evaluation du volume d'atteinte de l'opérateur (H95)..... 157
Figure III.65 L'évaluation du champ visuel du futur opérateur pendant la future activité de filetage (H95) ……..... 157

ANNEXES

TABLE DE MATIERES

A1. Les Tableaux du Régime Général de la Sécurité Sociale (54,97,98)…… 201
A2. Critères de classification des mannequins numériques…… 204
A3. Méthodes et outils d'évaluation ergonomique…….... 205
A4. L'outil ACTOGRAM - KRONOS – outil d'observation et d'analyse de l'activité…… 209
A5. La méthode ergonomique RULA…… 214
A6. Centrale CAPTIV de mesure et d'observation…….. 218
A7. Evaluation de l'activité de filetage (Sujet F5)……..…… 222
A8. Synthèse – Evolution des scores RULA de l'activité GP de filetage…… 224
A9. La nouvelle version du mannequin numérique MANERCOS…….. 225

A1. Les Tableaux du Régime Général de la Sécurité Sociale

A1.1

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste limitative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
-A- Epaule Epaule douloureuse simple (tendinopathie de la coiffe des rotateurs).	7 jours	Travaux comportant habituellement des mouvements répétés ou forcés de l'épaule.
Epaule enraidie succédant à une épaule douloureuse simple rebelle	90 jours	Travaux comportant habituellement des mouvements répétés ou forcés de l'épaule
-B- Coude Epicondylite	7 jours	Travaux comportant habituellement des mouvements répétés de préhension ou d'extension de la main sur l'avant-bras ou des mouvements de supination et pronosupination.
Epitrochléite	7jours	Travaux comportant habituellement des mouvements répétés d'adduction ou de flexion et pronation de la main et du poignet ou des mouvements de supination et pronosupination.
Hygromas : ¨ hygroma aigu des bourses séreuses ou atteinte inflammatoire des tissus sous-cutanés des zones d'appui du coude ;	7jours	Travaux comportant habituellement un appui prolongé sur la face postérieure du coude
¨ hygroma chronique des bourses séreuses.	90 jours	Travaux comportant habituellement un appui prolongé sur la face postérieure du coude.
¨ Syndrome de la gouttière épitrochléo-olécrânienne (compression du nerf cubital).	90 jours	Travaux comportant habituellement un appui prolongé sur la face postérieure du coude.
-C- Poignet - Main et doigt Tendinite Ténosynovite	7 jours 7jours	Travaux comportant de façon habituelle des mouvements répétés ou prolongés des tendons fléchisseurs ou extenseurs de la main et des doigts.
Syndrome du canal carpien Syndrome de la loge de Guyon	30 jours 30 jours	Travaux comportant de façon habituelle, soit des mouvements répétés ou prolongés d'extension du poignet ou de préhension de la main, soit un appui carpien, soit une pression prolongée ou répétée sur le talon de la main.
-D- Genou Syndrome de compression du nerf sciatique poplité externe.	7jours	Travaux comportant de manière habituelle une position accroupie prolongée.
Hygromas : ¨ hygroma aigu des bourses séreuses ou atteinte inflammatoire des tissus sous-cutanés des zones d'appui dugenou	7jours	Travaux comportant de manière habituelle un appui prolongé sur le genou
¨ hygroma chronique des bourses séreuses.	90 jours	Travaux comportant de manière habituelle un appui prolongé sur le genou
Tendinite sous-quadricipitale ou rotulienne Tendinite de la patte d'oie.	7 jours	Travaux comportant de manière habituelle des mouvements répétés d'extension ou de flexion prolongées du genou.
-E- Cheville et pied	7jours	Travaux comportant de manière habituelle des mouvements répétés d'extension ou de flexion prolongées du genou.
Tendinite achiléenne	7jours	Travaux comportant de manière habituelle des efforts pratiqués en station prolongée sur la pointe des pieds.

TABLEAU N° 97

Affections chroniques du rachis lombaire provoquées par des vibrations de basses et moyennes fréquences transmises au corps entier

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste limitative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Sciatique par hernie discale L4-L5 ou L5-S1 avec atteinte radiculaire de topographie concordante. Radiculalgie crurale par hernie discale L2-L3 ou L3-L4 ou L4-L5, avec atteinte radiculaire de topographie concordante.	6 mois (sous réserve d'une durée d'exposition de 5 ans)	Travaux exposant habituellement aux vibrations de basses et moyennes fréquences transmises au corps entier: ♦ par l'utilisation ou la conduite des engins et véhicules tout terrain : chargeuse, pelleteuse, chargeuse-pelleteuse, niveleuse, rouleau vibrant, camion tombereau, décapeuse, chariot élévateur, chargeuse sur pneu ou chenilleuse, bouteur, tracteur agricole ou forestier. ♦ par l'utilisation ou la conduite des engins et matériels industriels : chariot automoteur à conducteur porté, portique, pont roulant, grue de chantier, crible, concasseur, broyeur. ♦ par la conduite de tracteur routier ou de camion monobloc

TABLEAU N° 98

Affections chroniques du rachis lombaire provoquées par la manutention manuelle de charges lourdes

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste indicative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Sciatique par hernie discale L4-L5 ou L5-S1 avec atteinte radiculaire de topographie concordante. Radiculalgie crurale par hernie discale L2-L3 ou L3-L4 ou L4-L5, avec atteinte radiculaire de topographie concordante.	6 mois (sous réserve d'une durée d'exposition de 5 ans)	Travaux de manutention manuelle de charges lourdes effectués : ♦ dans le frêt routier, maritime, ferroviaire, aérien ♦ dans le bâtiment, le gros-oeuvre, les travaux publics ♦ dans les mines et carrières ♦ dans le ramassage d'ordures ménagères et de déchets industriels ♦ dans le déménagement, les gardes meubles ♦ dans les abattoirs et les entreprises d'équarrissage ♦ dans le chargement et le déchargement en cours de fabrication, dans la livraison, y compris pour le compte d'autrui, le stockage et la répartition des produits industriels et alimentaires, agricoles et forestiers; ♦ dans le cadre des soins médicaux et paramédicaux lors de la manutention de personnes ♦ dans le cadre du brancardage et du transport de malades ♦ dans les entreprises funéraires.

A2. Critères de classification des mannequins numériques

	Critère	MANNEQUIN	JACK	PCMAN	RAMSIS	SAFEWORK	SAMMIE	MANERCOS
1	***Plate-forme informatique***	PC	Silicon Graphiques	-	Station Graphique	PC ; SGI	Station Graphique	PC
2	***Logiciel support CAO***	Non spécifié	-	-	CATIA ; ICEM –DDN;SYRKO	CATIA DV		3D Studio MAx
3	***Génération de l'environnement 3D***	Formes simples	Possible + Importé Autocad, Pro/Eng	Importé	Mannequin exporté vers Catia	Importé	Possible	Importé
4	***Base de données anthropométriques***	Populations de différents percentiles + enfants 3 à 12 ans	US Army, NASA	-	Population allemande	US Armée Nautick et Kriss 1997 + différentes bases de données	UK adults, Bodyspace,etc	Données HUMANOID
5	***Structure cinématique***	Moyenne	69 segm. corp; 68 artic; 135 degrés de liberté	-	53 articulations + 104 degrés de liberté	100 Liaisons independents , 104 variables anthropométriques + 148 degrés de liberté	25 Segments corporels + 17 articulations	17 Segments corporels
6	***Esthétique - mannequin***	Interactif à souris	Bonne	-	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
7	***Manipulation***	Interactif à la souris	Interactif à souris	-	Interactif à la souris + Cinématique inverse	Interactif à la souris + Cinématique inverse + Cinématique directe	Interactif à la souris Clavier	Interactif à la souris + Cinématique inverse
8	***Analyse –vol. d'atteinte***	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	OUI
9	***Analyse – champ visuel***	Oui	OUI		Oui	Oui	Oui	OUI
10	***Modules ergonomiques***	NIOSH	NIOSH; RULA; OWAS; MTM; Métab.energ, ...	Oui (via RAMSIS)	Analyse de postures	RULA; NIOSH; Dépense énergétique+ Garg ; MTM; Angles de confort	RULA, OWAS, NIOSH	NIOSH, Métab. Energ.; RULA ; Analyse de temps
11	***Détection de collisions***	Non	Oui	-	Oui	Oui		Non
12	***Analyse vidéo***	Non	Non	Oui ?!	Non	Non	Non	Oui
13	***Rendu vidéo***		Oui?	Non	Oui	Oui		Oui

A3. Méthodes et outils d'évaluation ergonomique

A3.1 Classification selon leur complexité - MALCHAIRE J. (2001):

1. *Norme OSHA*
2. *Méthodes Sirtés (Renault)*
3. *Méthode FIOH*
4. *Code australien*
5. *Méthode développée par Kemmlert*
6. *Méthode FIFARIM*
7. *Grille BES*
8. *Méthode RULA*
9. *Méthode NIOSH*
10. *Données psychophysiques*
11. *Méthode OWAS*
12. *Méthode TRAC*
13. *Méthode HARBO*
14. *Méthode développée par RODGERS*
15. *Méthode ARBAN*
16. *Les modèles biomécaniques à é ou 3 dimensions*
17. *Méthode développée par KEYSERLING*
18. *Méthode développée par WEELS*
19. *Le Lumbar Motion Monitor*

A3.2 Description

Méthodes d'évaluation ergonomique	Outils d'évaluation	Indicateurs - Système de cotation – Valeurs limites	Source
Questionnaire	Check – lists; Goniomètres, Vidéos,	3 niveaux: acceptable, non recommandé et à éviter	APTEL (2000)
RULA – outil de dépistage de TMS du membre supérieur Permet l'évaluation des postures au niveau de la nuque, du tronc, des membres supérieures et l'évaluation des sollicitations musculaires		- Observation des postures des membres supérieures et comparaison avec des zones d'amplitudes de mouvements; - Deux tipes d'amplitudes articulaires: celles situés dans une zone de confort et celles situés dans des zones à risque; hiérarchisation des amplitudes articulaires en fonction de leur niveau de risque; en fonction de l'appartenance à une zone, pour chaque segment de membre s'attribue un score; - à la fin s'attribue un score global pour les deux groupes de segments corporels observés à l'aide d'un tableau de correspondance; - COTATION: Evaluation quantitative (++)	MCATAMNEY ET CORLETT (1993)

Méthodes d'évaluation ergonomique	Outils d'évaluation	Indicateurs - Système de cotation – Valeurs limites	Source
OWAS – méthode de détermination des postures de travail et d'évaluation de leur charge musculo-squelettiques		- classification des postures pour le dos, les bras et les jambes, en fonction de temps (selon une échelle de risque); - pour chaque segment corporel on sélectionne une valeur en fonction de la situation observée; - COTATION: Evaluation qualitative (+)	APTEL (2000) ; OWAS (1992) et Kivi (1991)
STRAIN INDEX – méthode de analyse semi – quantitative des postes de travail et de dépistage des facteurs de risque à TMS		- estimation subjective de la position de la main et du poignet par rapport à la position neutre - COTATION: Evaluation qualitative (++)	APTEL (2000) – MOORE S. et GARG A (1995)
OCRA – indice d'exposition au risque associé au mouvement répétitif du membre supérieur		Etapes: repérage des taches répétitives, définition des actions techniques dans les cycles représentatives de chaque tache, description et quantification des facteurs de risque. L'indice OCRA établi par l'appréciation des amplitudes articulaires (méthodologie semblable à RULA) Facteur pas prédominant dans cette méthodologie; Fp = Coefficient x Val attribuée - COTATION: Evaluation qualitative (+)	COLOMBINI (1998), OCCHIPINTI (1998)

Méthodes d'évaluation ergonomique	Outils d'évaluation	Indicateurs - Système de cotation – Valeurs limites	Source
OBSERVATIONNAL ANALYSIS OF THE HAND AND WRIST – Méthode de STETSON -méthode quantitative d'observation centrée sur la répétitivité au poste de travail		-amplitudes articulaires pour le poignet et la main – nombre de fois quand le poignet est en flexion, extension, déviation radiale/cubitale, position de pincement index/pouce par cycle Il n'y a pas d'estimation angulaire des amplitudes articulaires; détermine la fréquence de positions articulaires à risque pour le poignet qui s'éloigne d'axes de confort connus COTATION: Evaluation qualitative (+)	APTEL (2000) STETSON D. et coll (1991)
INDEX CTD – Methode de Weston (1997) -établit un niveau de sollicitation au-delà duquel il existe un risque de TMS		- facteur de posture; - score attribué aux postures observées pour les différents segments de membre (comme RULA) - 3 niveaux de risque ; - facteur ajusté par un coefficient " temps maintenu dans la posture" – en fonction d'une équation de fatigue – équation de Shutz - facteur non prépondérant - COTATION: Evaluation qualitative (+)	APTEL (2000) – WESTON R. et coll (1997)
Méthode de Latko et coll. – méthode d'observation de l'activité de la main et d'évaluation de la force et de la répétitivité par l'aide d'une échelle subjective en 10 points		- évaluation par l'aide d'une liste de postures à risques - COTATION: Evaluation qualitative (+)	APTEL (2000) LATKO W. et coll. (1997)

A4. L'outil ACTOGRAM - KRONOS – outil d'observation et d'analyse de l'activité

- outil conçu par Kerguelen (1986) pour faciliter le traitement des données d'observations chronologiques (http://www.univ-tlse2.fr/ltc/kronos)

- initial KRONOS ⇨ aujourd'hui Actogram KRONOS

Les **types de relevés** qu'il utilise :

- *des relevés d'observations comportementales ;*
- *des mesures numériques.*

Quatre **types de documents** sont gérés par Kronos:

a. Les protocoles de description

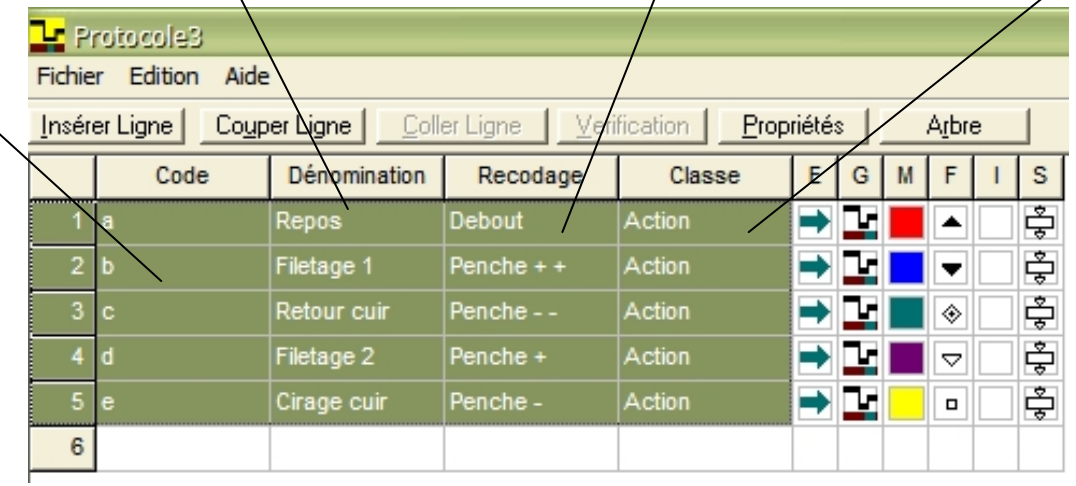
b. Les relevés d'observations

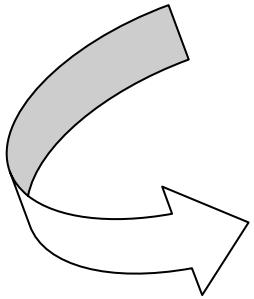
c. Les séquences

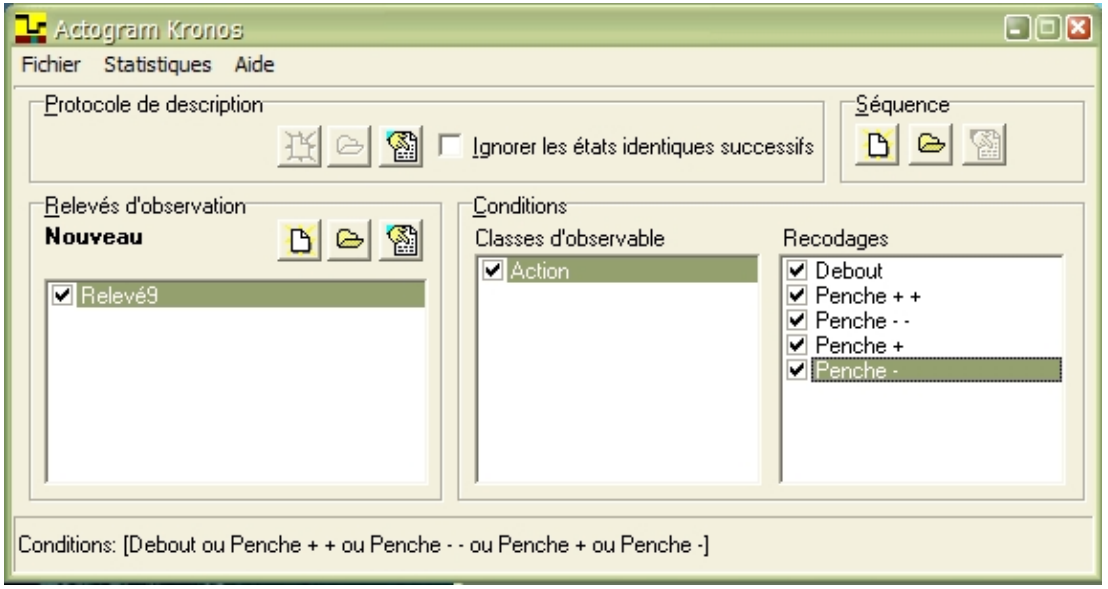
d. Les résultats sous différentes formes (graphiques, tableaux statistiques, histogrammes,…)

A4.1 Protocole de description

Colonne des codes saisies *Colonne des dénominations* *Colonne des observables* *Colonne des classes*

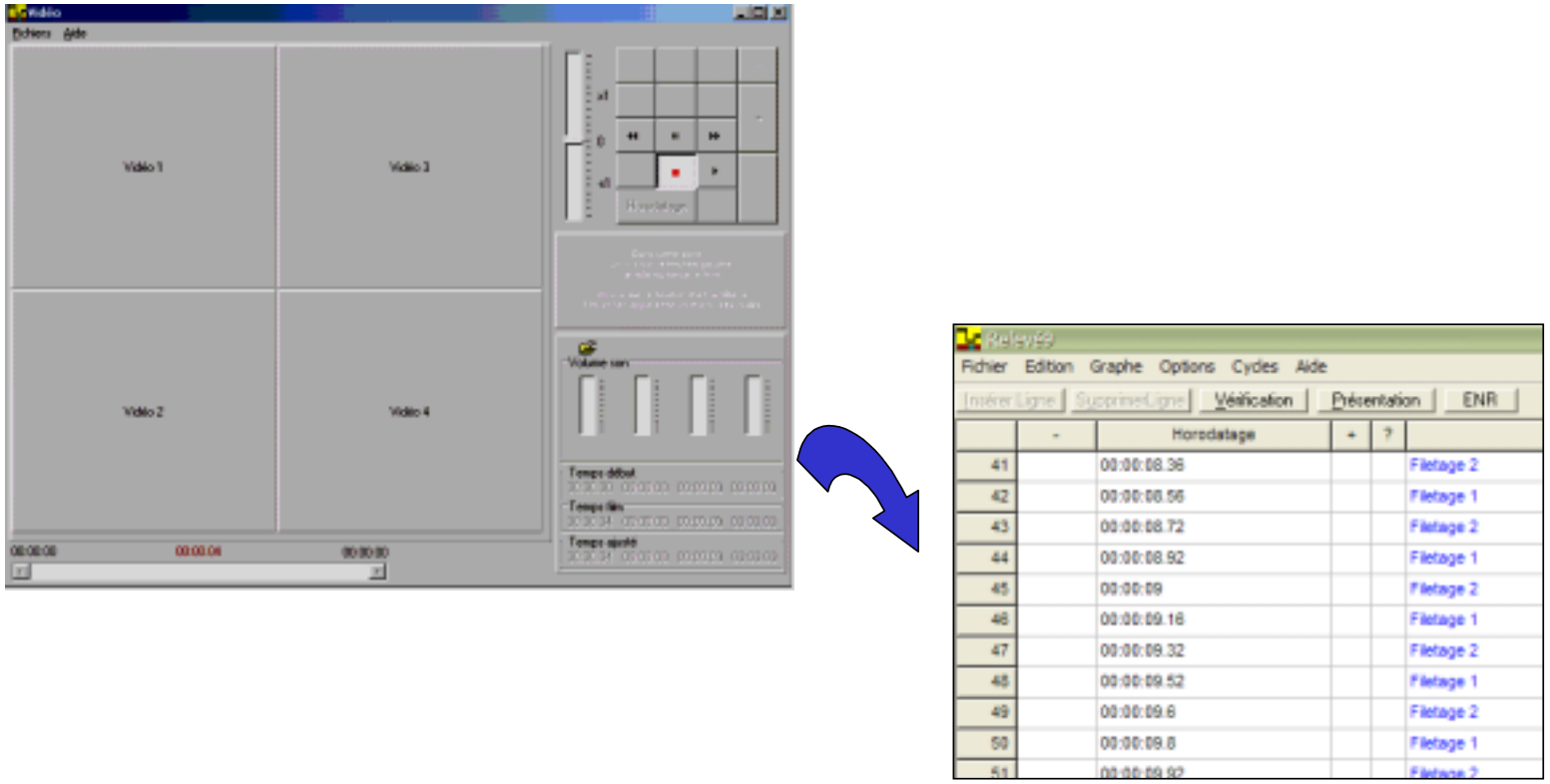






A4.2 Relevés d'observations

Il s'agit des tableaux où chaque ligne correspond à un événement daté (par défaut : horaire du système). Ils peuvent être obtenus en saisie manuelle au clavier ou à partir d'enregistreurs d'événements.



A4.3 Résultats

L'outil Kronos permet de connaître:

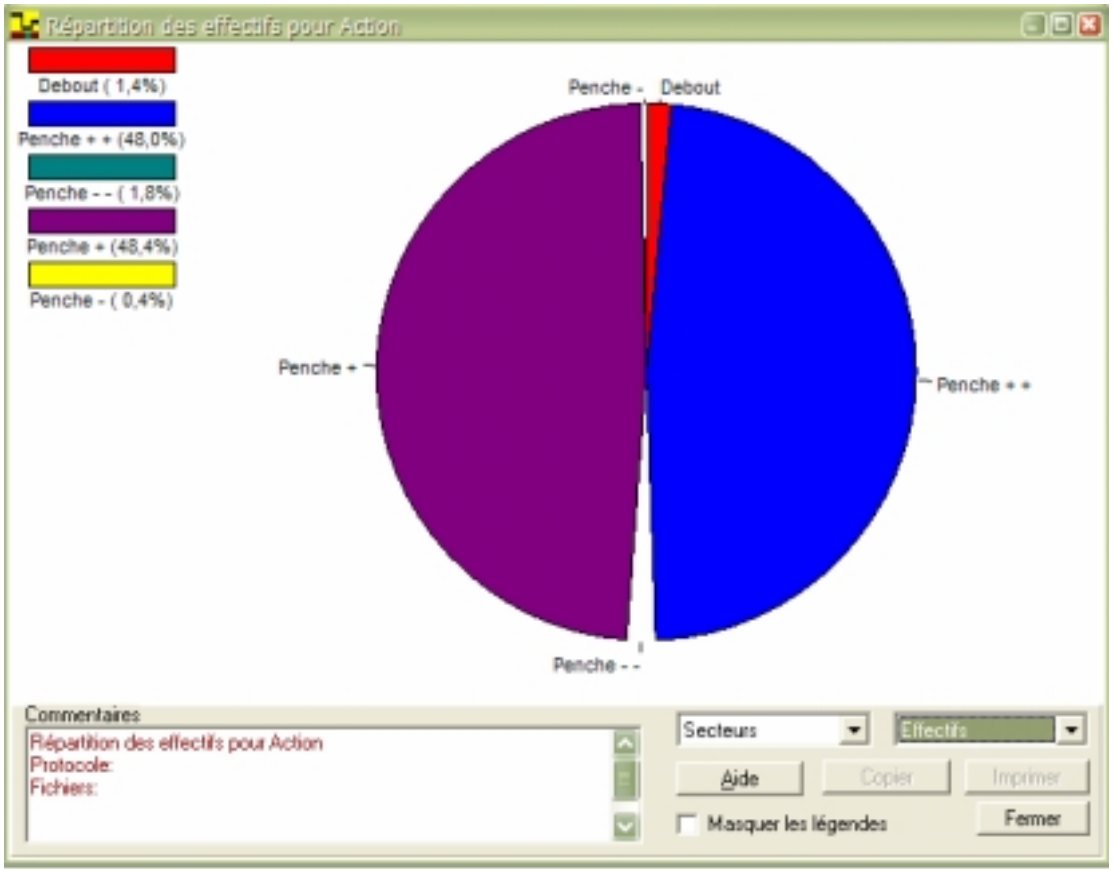
- graphe d'activité,
- séquencement des observables,
- évènements simultanés (ex : action associée à une posture),
- la répartition des observables suivant leur classe en terme de pourcentages d'effectifs et de durées de chaque observable,…

Le tableau de données statistiques

Durées d'états

Recodage	Classes	n	%(n)	Moyenne	Total	%(t)	Ecart-type	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart-InterQ
Debout	Action	3	1,1	06:24:59	19:14:57		09:04:25	00:00:01	19:14:55	00:00:01	
Penche + +	Action	134	48,2	00:00:00	00:00:49		00:00:00	00:00:00	00:00:03	00:00:00	00:00:00
Penche - -	Action	5	1,8	00:00:03	00:00:13		00:00:04	00:00:00	00:00:10	00:00:01	00:00:03
Penche +	Action	135	48,6	00:00:00	00:00:50		00:00:01	00:00:00	00:00:05	00:00:00	00:00:00
Penche -	Action	1	0,4	00:00:01	00:00:01						

Résultats sous forme de histogramme



A5. La méthode ergonomique RULA

A5.1 Terminologie

Méthode RULA – Rapid Upper Limb Assessment – Evaluation rapide des membres supérieurs (Méthode d'évaluation des facteurs de risque professionnel de troubles musculo-squelettiques du membre supérieur)

A5.2 Réferences

McATAMNEY L., CORLETT E.N. (1993) - *Rapid upper limb assessment (RULA): A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics, vol.24, n°. 2, 91-99.*

Traduction INRS (1996) – *RULA: Méthode d'évaluation des facteurs de risque professionnel de troubles musculo-squelettiques du membre supérieur*

A5.3 Description

- méthode conçue pour évaluer **4 facteurs de sollicitations**:
    - nombre de mouvements;
    - travail musculaire statique;
    - force;
    - postures.

- permet **l'évaluation** rapide :
    - des postures au niveau de la nuque, du tronc et des membres supérieurs;
    - de l'utilisation des muscles - de la fonction musculaire;
    - des forces -sollicitations supportées par le corps.

A5.4 <u>Système de cotation</u> :

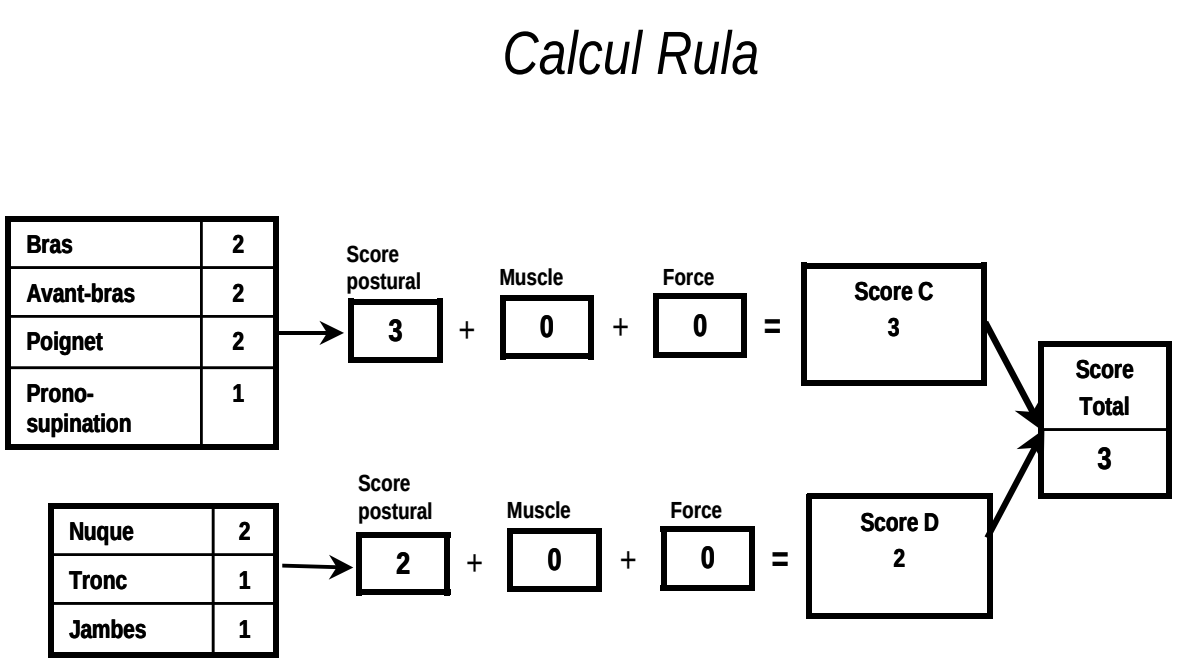
- un score de position est attribué à chaque articulation à partir de tables et de schémas;

- un tableau permet de globaliser ces scores pour chacun des deux groupes;

- un score de contraction statique des muscles et un score de force tenant compte de la répétitivité de mouvements sont déterminés pour chacun des groupes (A et B);

- ils sont à nouveau globalisés avec les scores de position (***Score C et D***);

- une table finale permet d'obtenir un score global unique à partir des deux groupes (***Score Total***);



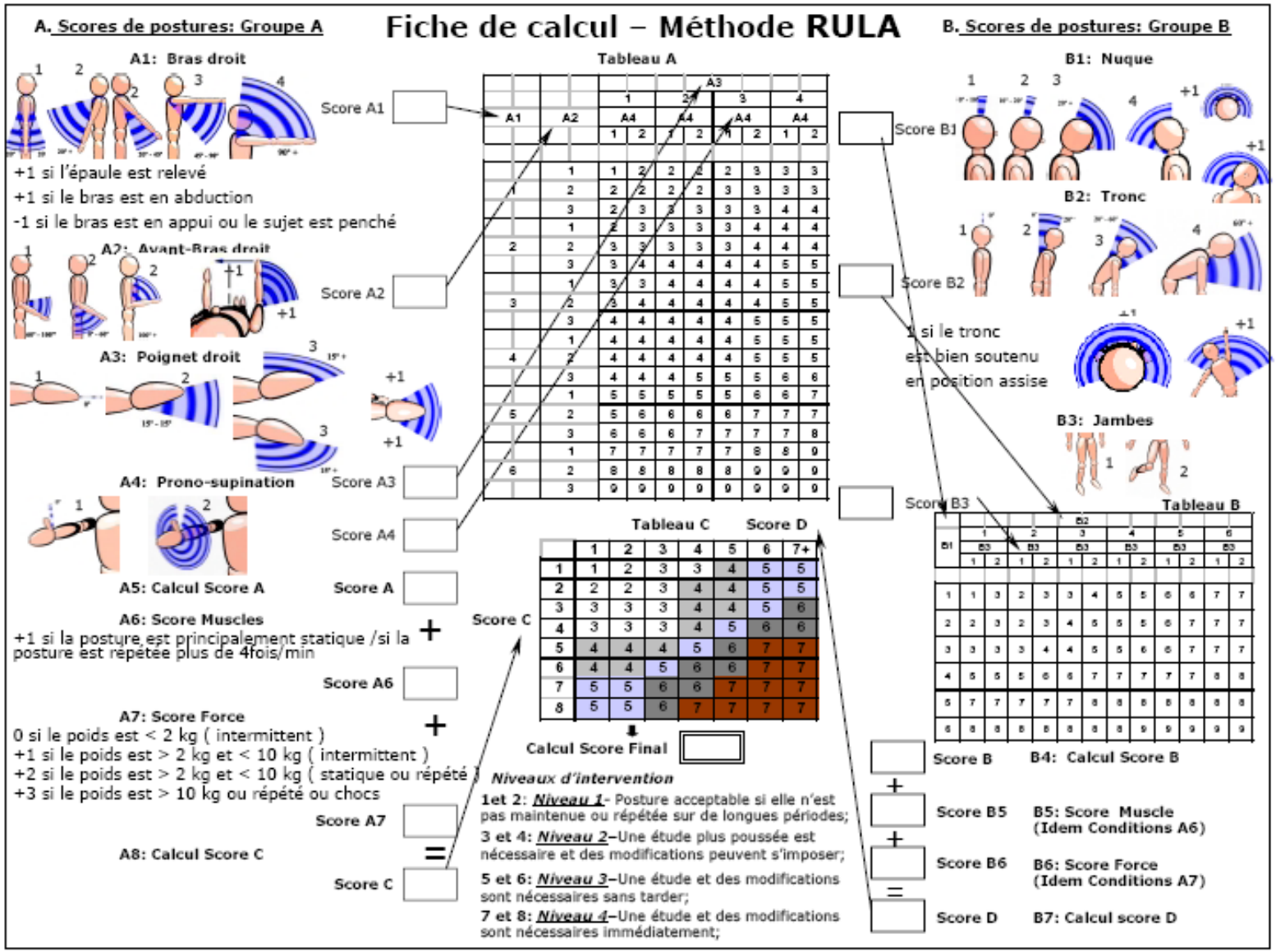
A5.5 Analyse et interprétation des résultats:

- 4 niveau de risque sont définis à partir du score final:
    - Scores 1 et 2: **Niveau 1**- Le risque est faible et considéré comme acceptable si l'effort n'est pas maintenu ou répété durant une longue période;
    - Scores 3 et 4: **Niveau 2** - Une étude plus approfondie est nécessaire et des changements pourraient être requis;
    - Scores 5 et 6: **Niveau 3** - Une étude plus approfondie et des changements sont nécessaires dans un avenir proche;
    - Scores 7: **Niveau 4** - Une étude plus approfondie et des changements sont immédiatement nécessaires.

Caractéristique de la méthode:

- quantification par différents scores partiels pour aboutir à un score global sensé définir le niveau de risque ;
- permet de qualifier la situation sans en rechercher les causes

A5.6 Fiche de calcul pour la méthode ergonomique RULA


Fiche de calcul – Méthode RULA
A. Scores de postures: Groupe A
A1: Bras droit
+1 si l'épaule est relevé
+1 si le bras est en abduction
-1 si le bras est en appui ou le sujet est penché
A2: Avant-Bras droit
A3: Poignet droit
A4: Prono-supination
A5: Calcul Score A
A6: Score Muscles
+1 si la posture est principalement statique /si la posture est répétée plus de 4fois/min
A7: Score Force
0 si le poids est < 2 kg (intermittent)
+1 si le poids est > 2 kg et < 10 kg (intermittent)
+2 si le poids est > 2 kg et < 10 kg (statique ou répété)
+3 si le poids est > 10 kg ou répété ou chocs
A8: Calcul Score C
Score A1
Score A2
Score A3
Score A4
Score A
Score A6
Score A7
Score C
Tableau A
Tableau C
Score D
Calcul Score Final
Niveaux d'intervention
1et 2: Niveau 1- Posture acceptable si elle n'est pas maintenue ou répétée sur de longues périodes;
3 et 4: Niveau 2–Une étude plus poussée est nécessaire et des modifications peuvent s'imposer;
5 et 6: Niveau 3–Une étude et des modifications sont nécessaires sans tarder;
7 et 8: Niveau 4–Une étude et des modifications sont nécessaires immédiatement;
B. Scores de postures: Groupe B
B1: Nuque
B2: Tronc
1 si le tronc est bien soutenu en position assise
B3: Jambes
Score B1
Score B2
Score B3
Tableau B
Score B
B4: Calcul Score B
Score B5
B5: Score Muscle (Idem Conditions A6)
Score B6
B6: Score Force (Idem Conditions A7)
Score D
B7: Calcul score D

A6. Centrale CAPTIV de mesure et d'observation

A6.1 Présentation de l'outil

- conçu par INRS et distribuée par la société FMA, la centrale CAPTIV est à la fois un outil d'acquisition et d'analyse ergonomique de l'activité d'usage ou de travail:

- **outil d'acquisition** – permet l'observation et l'enregistrement de l'activité à l'aide d'un banc d'observation vidéographique et des mesures de l'activité par intermédiaire des différents capteurs;

- **outil d'analyse** :

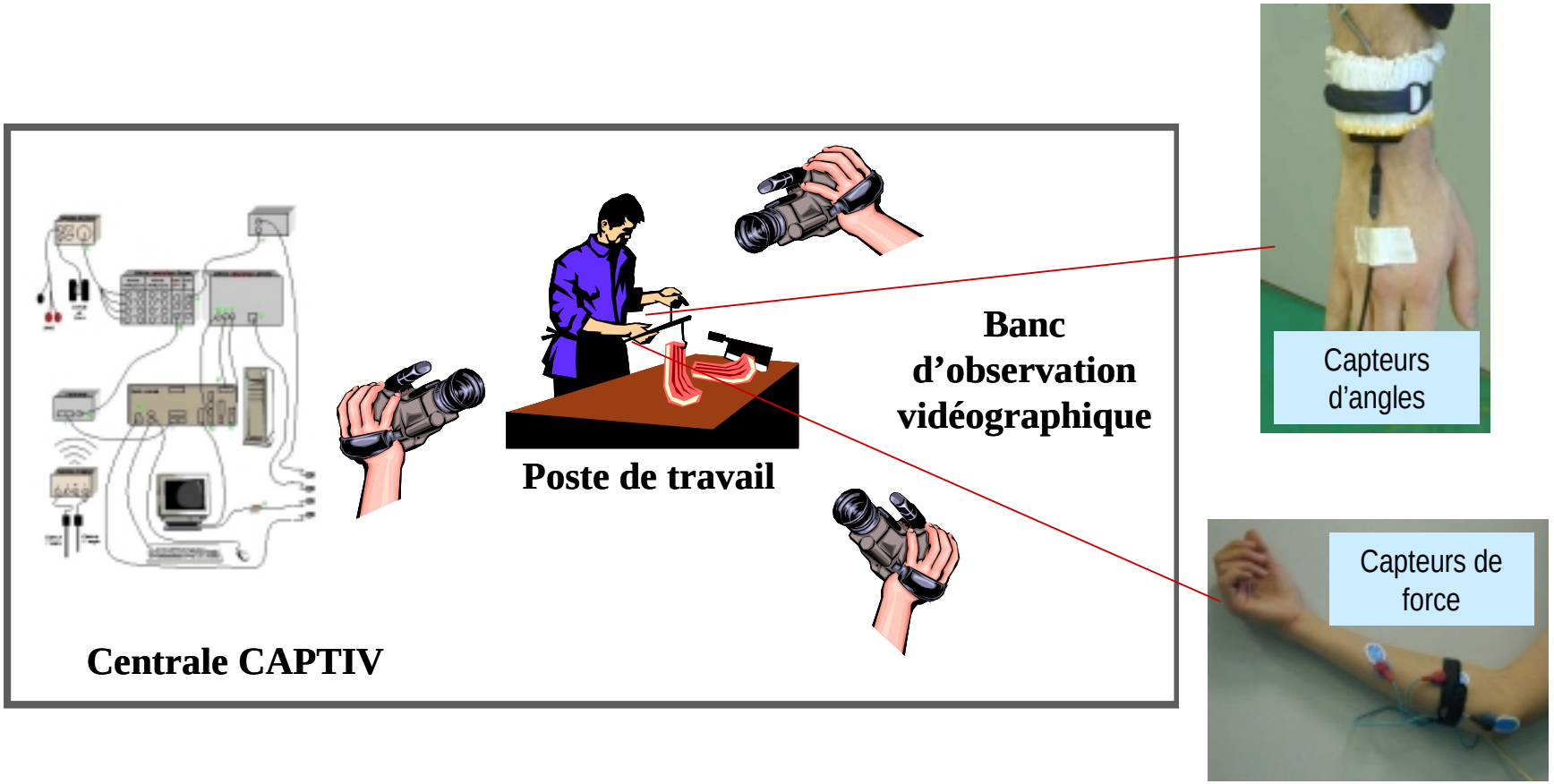
  - ***en temps réel***, par la synchronisation de l'image numérisée de la camera vidéo et des mesures réalisées à l'aide des différents capteurs;

  - ***post-codage***, par l'analyse de la vidéo à l'aide des observables définis par l'observateur (voir démarche KRONOS).

A6.2 Exemples de mesures réalisées à l'aide de la centrale CAPTIV

- Mesures des Angles (poignet, coude, etc.);
- Mesures d'Electromyogramme (EMG);
- Mesures de la Force Maximale Volontaire (FMV);
- Mesures d'Electrocardiogramme (ECG);
- Mesures de Pression;
- Mesures de température;
- Mesures de bruit;
- Mesures de poussière;
- etc.

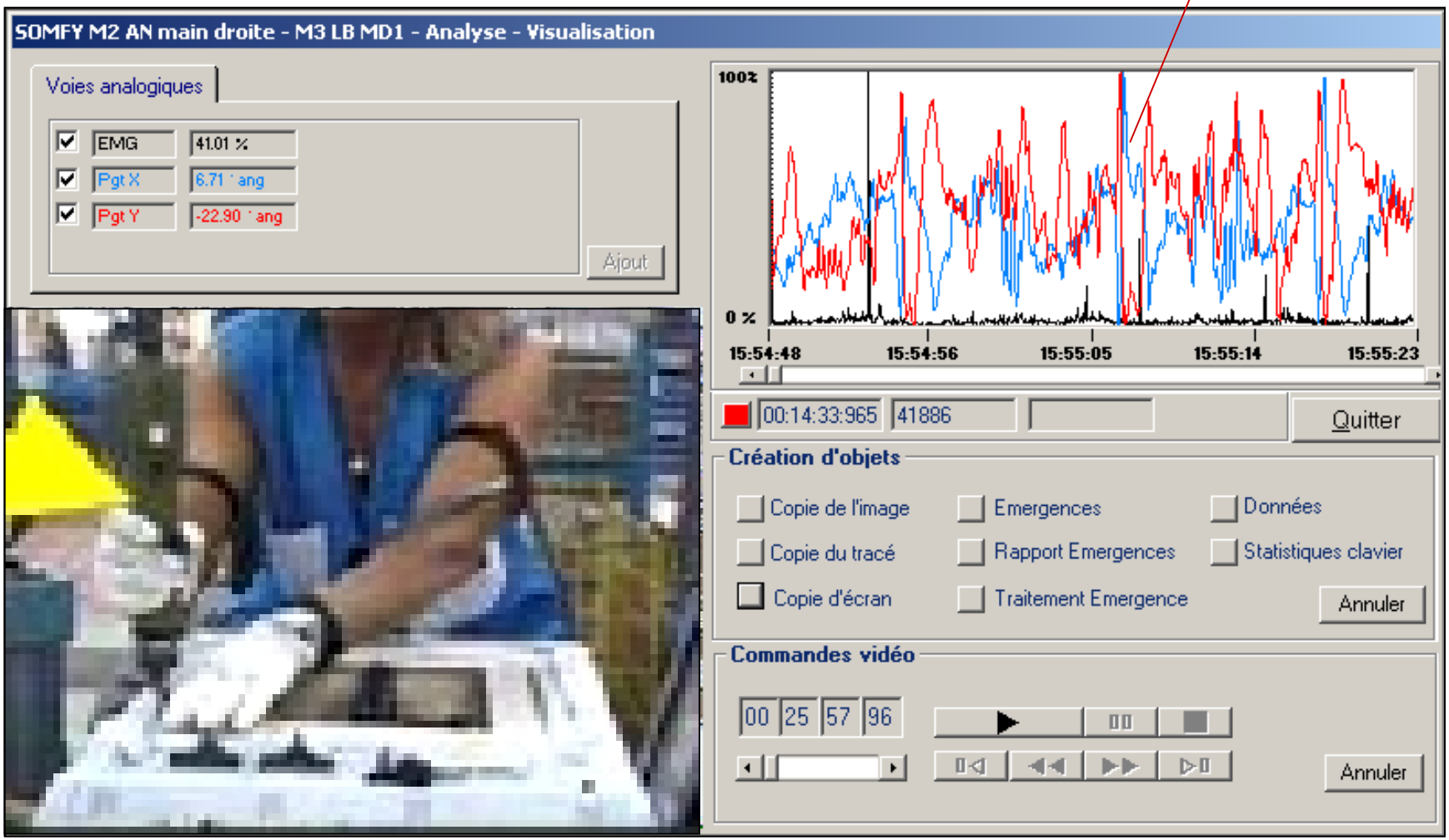
A6.3 Mesure à l'aide de la centrale CAPTIV



Centrale de mesure et d'observation CAPTIV

A6.4 Enregistrement de données [Source, FMA]

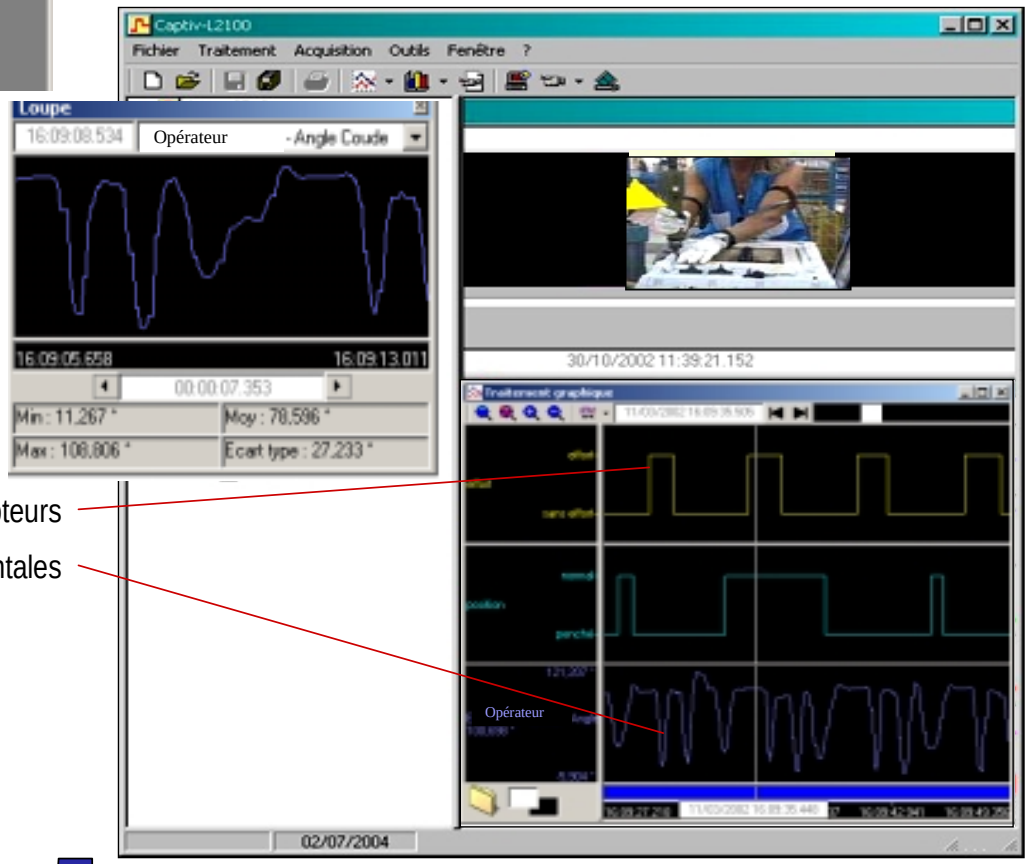
Observation et analyse en temps réel



A6.5 Analyse de données [Source, FMA]

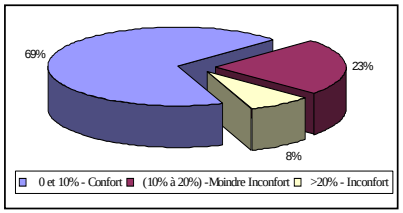
Protocole de description

Analyse post codage



Mesures capteurs

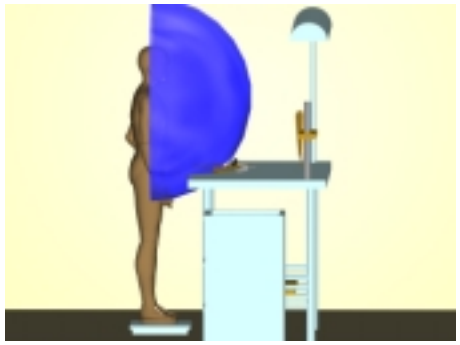
Données comportementales

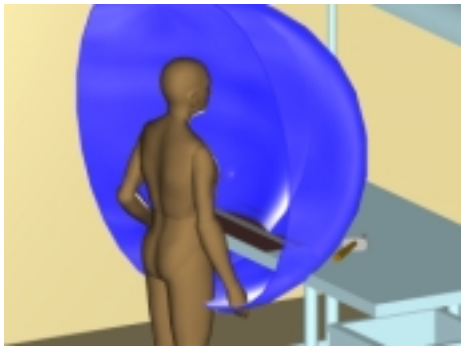


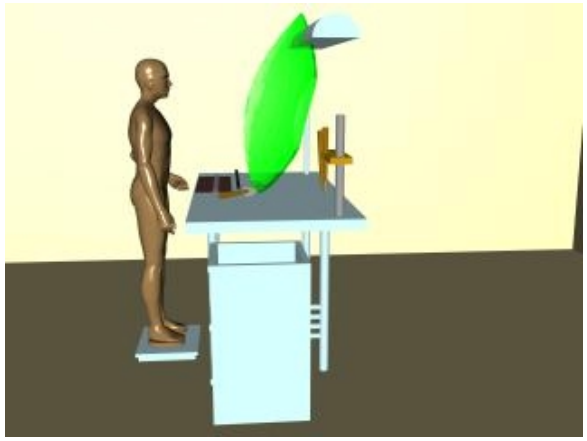
Histogramme

A7. Evaluation de l'activité de filetage (Sujet F5)

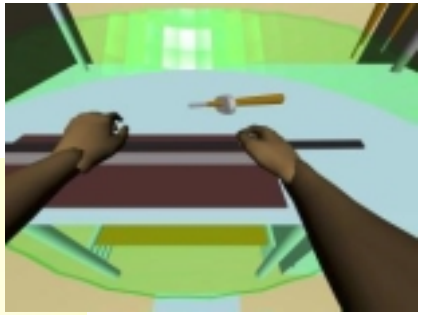
Evaluation du volume de confort

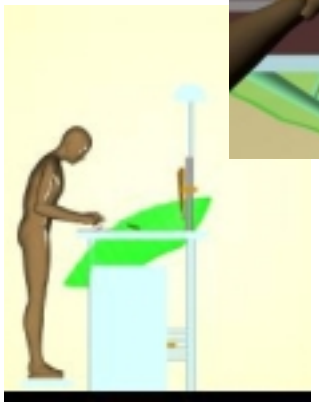




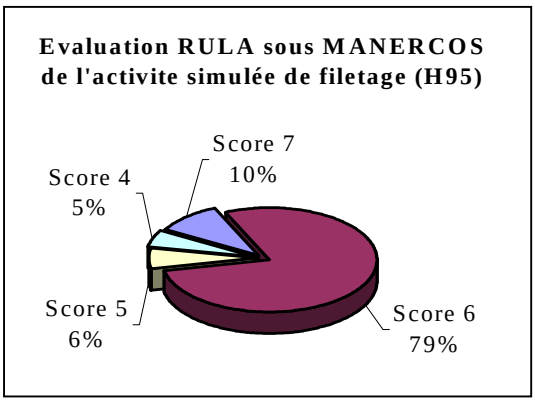


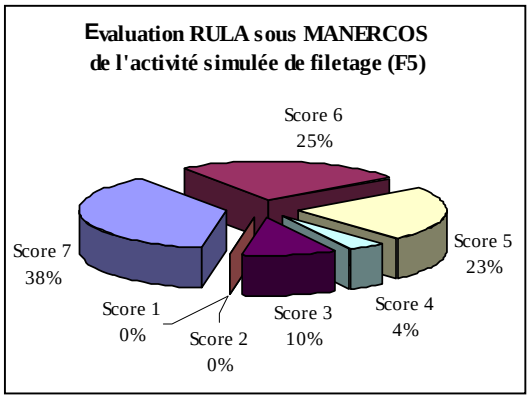
Evaluation du champ visuel





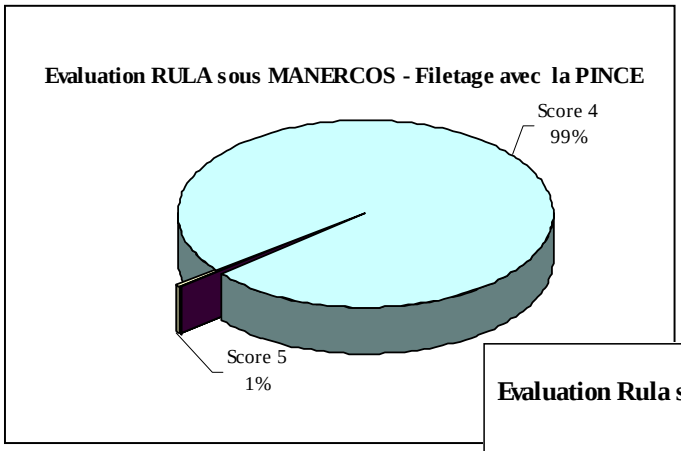
A8. Synthèse – Evolution des scores RULA de l'activité GP de filetage



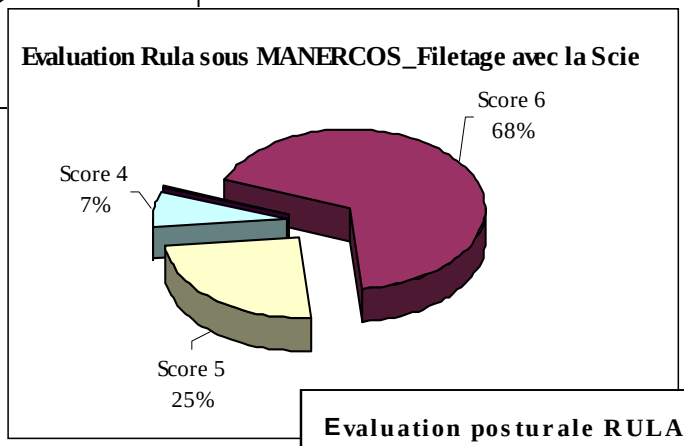


Evaluation RULA de l'activité GP simulée de filetage existante (sujets H95 et F5)

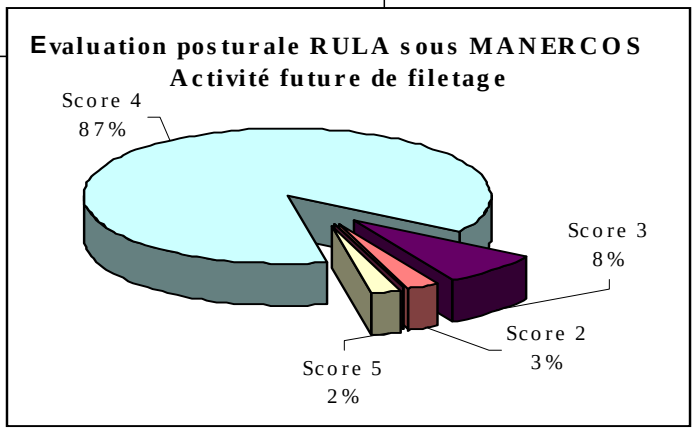
Evaluation RULA de l'activité GP simulée de filetage future à la pince (H95)



Evaluation RULA de l'activité GP simulée de filetage future avec la scie (H95)



Diminution des scores RULA

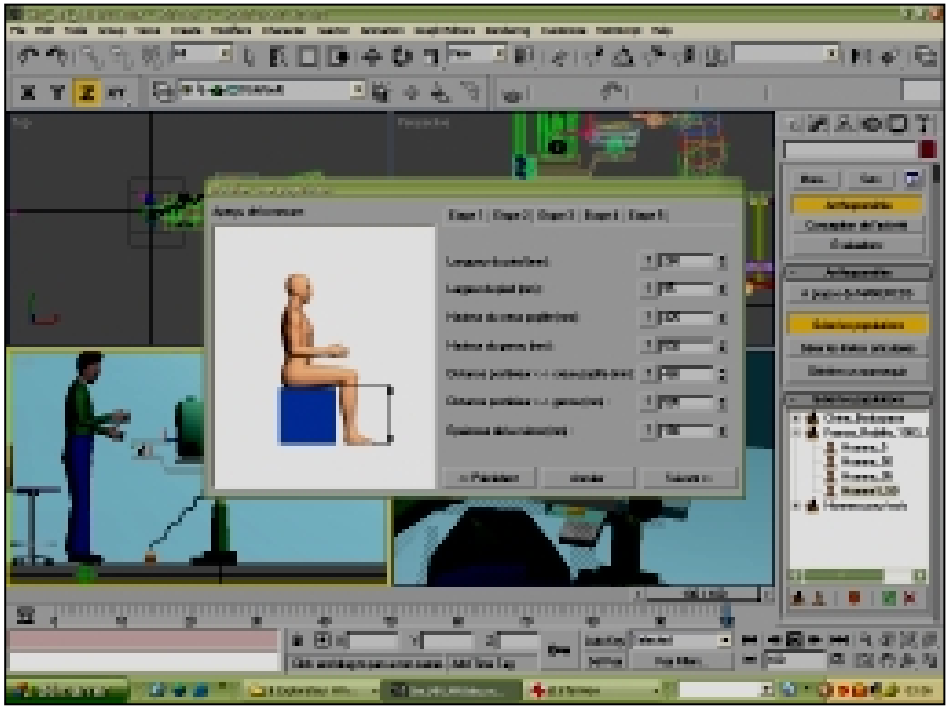


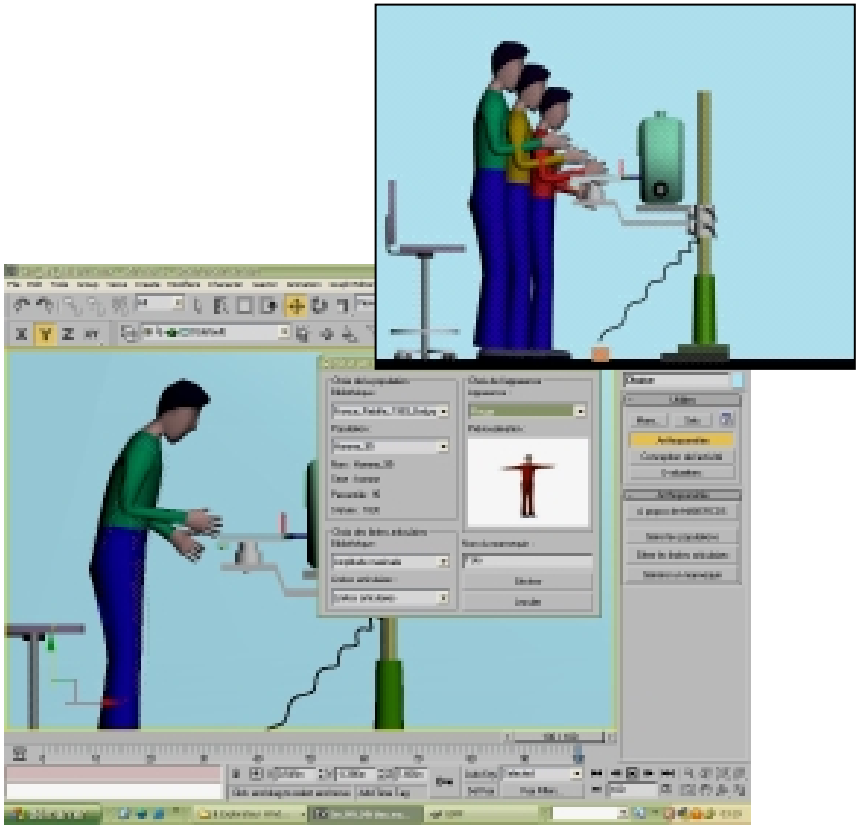
Evaluation RULA de l'activité GP simulée de filetage future avec la machine de pré-filetage

A9. La nouvelle version du mannequin numérique MANERCOS

A9.1 Module de Modélisation Anthropométrique

Modélisation des dimensions anthropométriques de la population ciblée

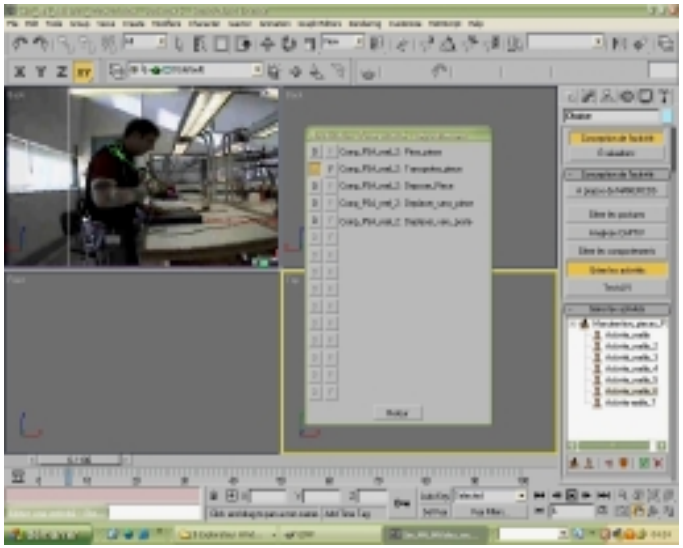


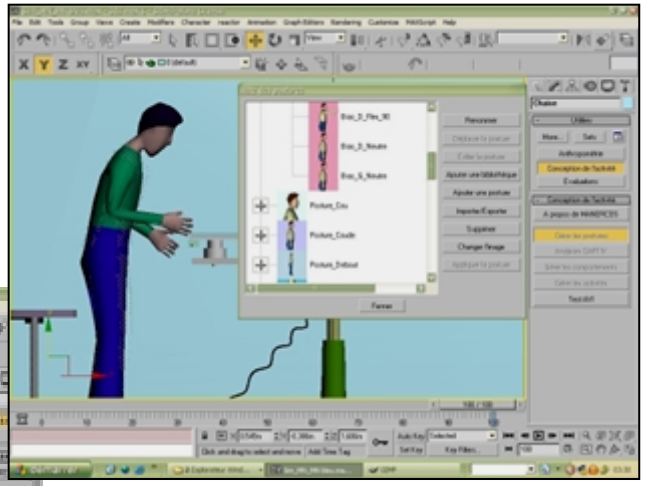


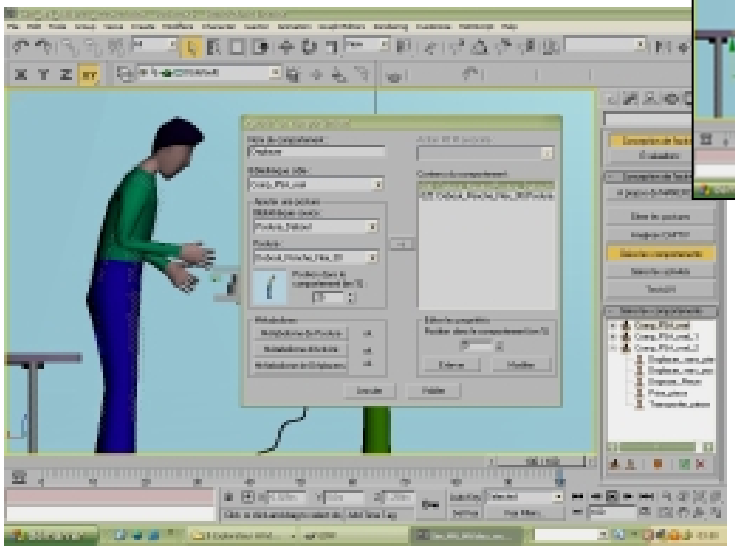
Génération de la population ciblée

A9.2 Module d'Analyse et Conception des Activités

Analyse de l'activité réelle : décomposition en comportements élémentaires, gestes et postures



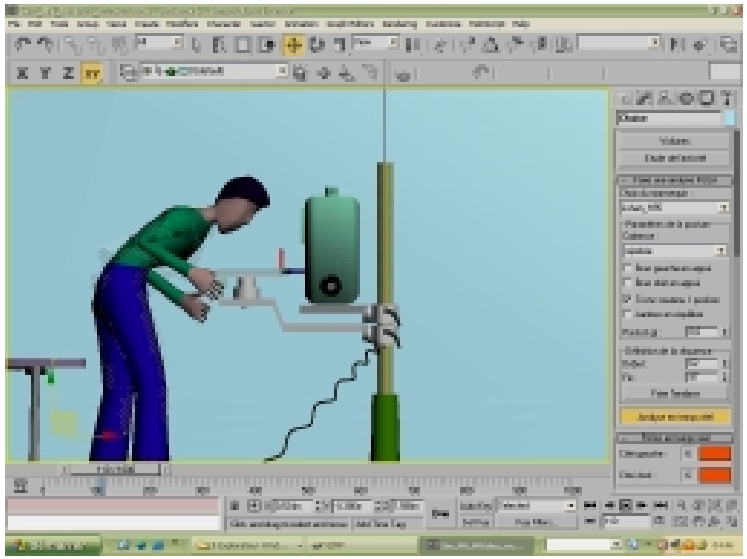




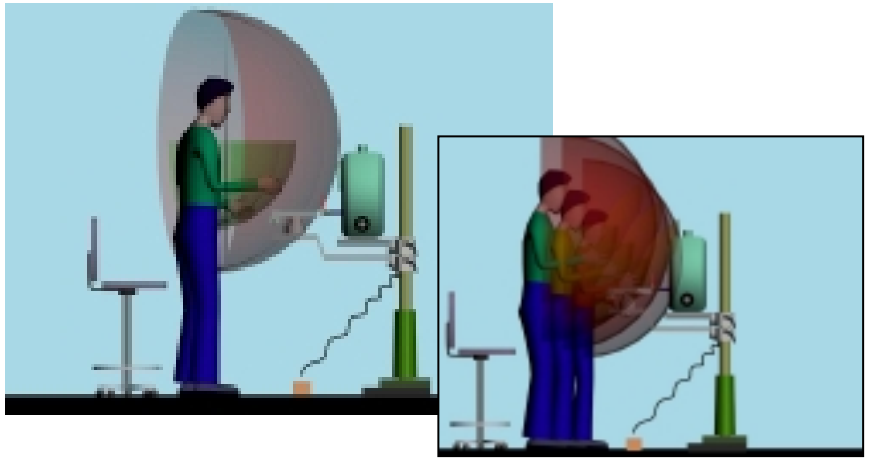
Définition des activités gestuelles et posturales futures souhaitables à partir de bibliothèques de gestes et postures, de comportements élémentaires

A9.3 Module d'Evaluation Ergonomique des Activités

Evaluation posturale RULA de l'Activité Simulée



Evaluation du volume de confort

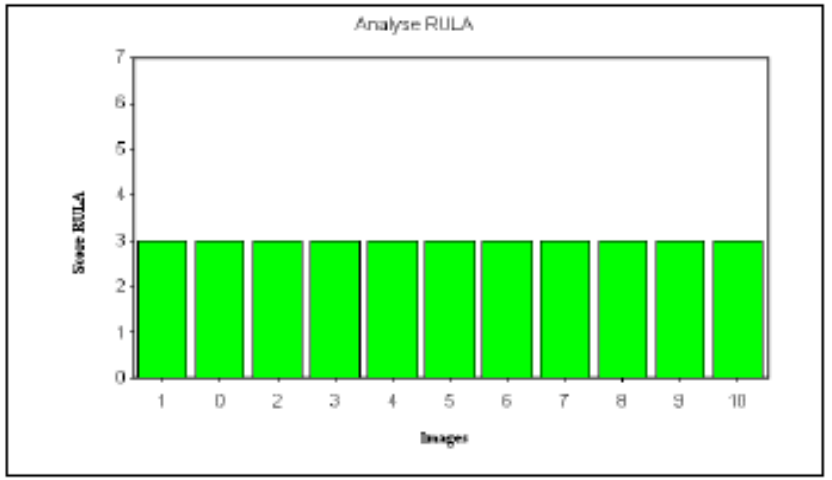


Compte-rendu de l'analyse RULA

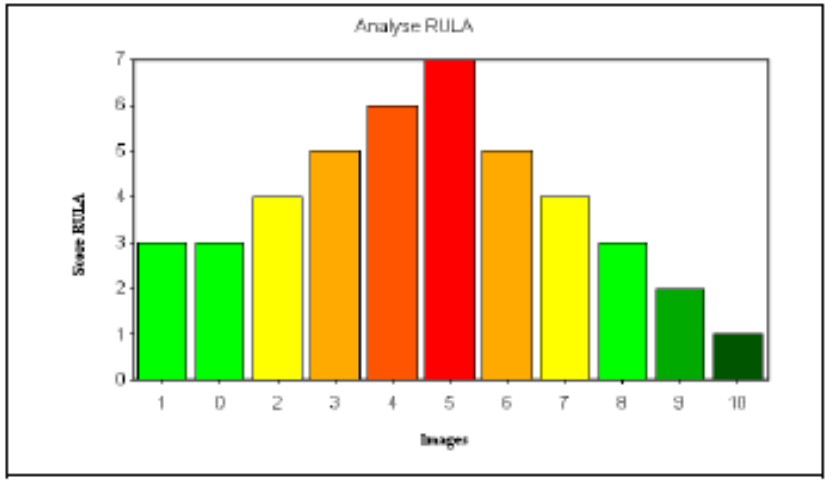
Numéro de l'image de début d'analyse : 0
Numéro de l'image de fin d'analyse : 10

I. Graphiques de la séquence

I.1. Evolution des scores pour le côté droit



I.2. Evolution des scores pour le côté gauche



INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Monsieur Améziane AOUSSAT, Professeur, ENSAM, Paris

Monsieur Simon RICHIR, Professeur, ISTIA, Angers

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame CHITESCU Liliana Cristina

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

"Simulation en ergonomie : facteur d'innovation dans la conception de produits - Application à la conception des systèmes de travail"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **« Génie des systèmes industriels »**

Fait à Vandoeuvre, le 17 novembre 2005
Le Président de l'I.N.P.L.,
L. SCHUFFENECKER

TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55

SIMULATION EN ERGONOMIE : FACTEUR D'INNOVATION DANS LA CONCEPTION DE PRODUITS.
Application à la conception de systèmes de travail

RESUME :

Positionnée dans le domaine du Génie des Systèmes Industriels, notre recherche s'intéresse à l'intégration du facteur humain dans le processus de conception de produits et des systèmes de travail associés. A l'appui des connaissances, des méthodes et des outils spécifiques issues des disciplines Sciences pour l'Ingénieur et Sciences Humaines et Sociales, notre travail propose ainsi une méthodologie de conception centrée sur l'Homme favorisant l'articulation "Ergonomie – Conception", dès le début et tout au long du processus. Au cœur de cette méthodologie se situe une méthode de simulation numérique des Activités Gestuelles et Posturales Humaines à l'aide des mannequins numériques, véritables modèles 3D de l'Humain. Ainsi, à travers cette méthode et par le biais de l'outil associé, MANERCOS – Module d'ANalyse pour l'ERgonomie et la COnception des Systèmes, nous proposons une nouvelle manière de concevoir ou re-concevoir de produits/systèmes de travail qui favorise l'innovation par une meilleure prise en compte des caractéristiques de l'Humain : anthropométriques, biomécaniques,… Par une application à la conception de systèmes de travail, nous montrons en particulier comment la méthodologie proposée permet de dépister et d'évaluer certains facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS), dus notamment au travail, à la conception des outils, des postes de travail, etc., et de contribuer ainsi à la prévention de ces maladies professionnelles en constante augmentation depuis plusieurs années. Plus précisément, la démarche proposée est à même de définir, tester, évaluer et valider, avec l'ensemble des acteurs métiers du processus de conception, des maquettes numériques de futurs systèmes de travail afin de pouvoir mieux les adapter aux futurs opérateurs, en termes de santé, sécurité, confort et efficacité au travail. Nous révélons ainsi les capacités et la richesse de l'outil MANERCOS, mais également la manière dont il doit évoluer pour encore mieux favoriser la coopération "ergonome – concepteur " au sein de la conception. En particulier, les nouvelles fonctionnalités apportées à ce mannequin numérique, couplées à une centrale de mesure de mouvements et d'efforts (Centrale CAPTIV) et en perspective à une plate-forme de réalité virtuelle vont permettre, par la prise en compte des Activités Gestuelles et Posturales, une meilleure évaluation et prédiction des risques d'apparition de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS).

MOTS-CLES : *Conception de Produits, Ingénierie Concurrente, Innovation, Ergonomie, Simulation Numérique, Mannequin Numérique, Maquettes Numériques, Réalité Virtuelle, Outils XAO, Système de travail, Activités Gestuelles et Posturales, Troubles Musculo-Squelettiques (TMS)*

DISCIPLINE: GENIE DE SYSTEMES INDUSTRIELS

SIMULATION IN ERGONOMICS: INNOVATOR FACTOR FOR THE PRODUCTS DESIGN.
Application to the work systems design

ABSTRACT :

This research is positioned in the Industrial Engineering field and it is dealing with the human factor integration in the design process of products and associated work systems. Using the knowledge, methods and specific tools of two disciplines (Engineering Science and Social and Human Science), the research proposes a human-centered design methodology that is allowing a better "Ergonomics Analyse – Products Design" articulation, from the very beginning to last stage of process. At the heart of this methodology there is a numerical simulation method of Gestural and Posturales Activities of Human that is possible with the support of the numerical mannequins which are the 3D human models. So, this method and the MANERCOS associated tool permit us to propose a new way to design and re-design the products/work systems which allows the innovation by a better consideration of the human characteristics: anthropometrical, biomechanical etc… By the application to the work systems design, we show particularly how the proposed methodology allows to detect and to estimate some of the risk factors of Work Related Musculoskeletal Disorders (WRMD) resulting from the working conditions, the tools and workplaces design etc., and how to contribute in this case to the prevention of the professional diseases in constant increase for several years. More specific, the proposed methodology bring together all the actors of design process to define, to test, to estimate and to validate the numerical mock-ups of future work systems, adapted to the future operators, in terms of health, safety, comfort and efficiency at work. So we reveal capacities and the effectiveness of the MANERCOS tool, but we also show the way to evolve it in order to make better the "ergonomist - designer" cooperation within the design process. Particularly, the new features brought to this numerical mannequin, coupled at a measure tool of movements and efforts (CAPTIV tool) and associated in prospect at a virtual reality platform, will permit a better evaluation and prediction of the risks of Work Related Musculoskeletal Disorders (WRMD), by taking into account the Gestural and Posturales Activities.

KEYWORDS : *Products Design, Concurrent Engineering, Innovation, Ergonomics, Numerical Simulation, Numerical Mannequin, Numerical Mock-Ups, Virtual Reality, CAD Tools, Work System, Gestural and Posturales Activities, Work Related Muskuloskeletal Disorders (WRMD)*

DISCIPLINE: INDUSTRIAL ENGINEERING

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

2 Avenue de la Forêt de Haye ; BP 3 54501 VANDOEUVRE LES NANCY - FRANCE